DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-37-49 УДК 621.039.7

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНТЕЙНЕРОВ ТИПА НЗК-150-1,5П ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ 2 КЛАССА

В. Т. Сорокин[1], Р. М. Гатауллин[2], Н. В. Свиридов[2], Д. И. Павлов[3]

[1]АО «Атомэнергопроект», Санкт-Петербург

[2]АО «345 МЗ», Балашиха, Московская область

[3]Санкт-Петербургский филиал АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» — «ВНИПИЭТ», Санкт-Петербург

Статья поступила в редакцию 21 апреля 2022 г.

Рассмотрено состояние и проблемы экспериментального и расчетно-аналитического обоснования долговечности железобетонного контейнера типа НЗК-150-1,5П при захоронении среднеактивных долгоживущих радиоактивных отходов 2 класса в пункте глубинного захоронения в Нижнеканском массиве (ПГЗРО НКМ). Показана необходимость актуализации нормативной базы в части требований к срокам сохранения защитных свойств таких упаковок с учетом защитных свойств всех барьеров системы захоронения.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, железобетонный контейнер, долговечность, захоронение, ПГЗРО.*

Введение

Согласно Федеральному закону «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» № 190-ФЗ от 11.07.2011 все удаляемые РАО должны быть переработаны и кондиционированы, то есть переведены в форму, отвечающую критериям приемлемости для захоронения.

Для кондиционирования низко- и среднеактивных отходов 3 и 4 классов широко применяются контейнеры: металлические КРАД, КМЗ и железобетонные типа НЗК различных исполнений. Для кондиционирования РАО 1 и 2 классов в настоящее время отсутствуют упаковки, которые отвечают требованиям нормативных документов по долговечности, равной 1 000 годам.

Наиболее актуальным является вопрос разработки контейнеров для среднеактивных долгоживущих РАО 2 класса, к которым относятся: металлические отходы, отработавший графит уран-графитовых реакторов, цементированные ЖРО радиохимических производств и др.

Предложения по использованию металлических контейнеров для кондиционирования и захоронения упаковок РАО 2 класса не имеют в настоящее время достаточного как научного, так и технико-экономического обоснования.

В качестве альтернативного решения для кондиционирования среднеактивных долгоживущих РАО 2 класса могут быть предложены железобетонные невозвратные защитные контейнеры НЗК-150-1,5П, выпускаемые по техническим условиям Л65.555.00.00.000 с улучшенными характеристиками, отвечающими современным нормативным требованиям.

Краткий обзор исследований по долговечности бетона и железобетона

В мировой практике отсутствуют нормативные документы по обоснованию срока службы железобетонных конструкций свыше 100 лет. Это объясняется относительной «молодостью» современного бетона и железобетона (около 180 лет) и многообразием условий эксплуатации конструкций из них.

Сроки службы таких инженерных сооружений (до 100 лет) в России приведены в следующих нормативных документах:

- СП 28.13330.2017 Свод правил. Защита строительных конструкций от коррозии;
- СП 35.13330.2011 Свод правил. Мосты и трубы. Ред. 2017 г.;
- СП 58.13330.2012 Гидротехнические сооружения;
- СП 120.13330.2012 Метрополитены. Ред. 2017 г.;
- СП 122.13330.2012 Тоннели железнодорожные и автодорожные. Ред. 2017 г.

В указанных выше нормативных документах, с учетом опыта эксплуатации перечисленных объектов, принято, что к столетнему сроку или раньше эти объекты, как правило, устаревают, не соответствуют новым условиям функционирования и подлежат реконструкции или сносу.

Аналогичное положение с оценкой и назначением сроков службы зданий и сооружений существует и в зарубежных развитых странах.

Срок службы бетона и железобетона изучается непрерывно с момента его появления. В публикациях [1—16] содержится информация, необходимая для рассмотрения и обоснования долговечности конструкционного материала железобетонного контейнера НЗК-150-1,5П, предлагаемого для размещения и захоронения среднеактивных РАО 2 класса.

Давно выявлено, что стойкость бетона и железобетона в различных условиях эксплуатации, именуемых «агрессивностью среды», сильно различается — от нескольких лет до нескольких столетий [1].

В технической литературе описано немало примеров тысячелетней эксплуатации сооружений, построенных из материала «типа бетона». Например, более 1 000 лет находятся в хорошем состоянии морские сооружения в Риме, купол римского Пантеона [2].

Применение бетона приобрело всемирные масштабы, и показатели его качества (прочность, долговечность) многократно выросли за практически двухсотлетнюю историю с момента его изобретения.

Так, в 1960 г. наибольшая прочность бетона составляла 40 МПа, в 1970 г. — 50 МПа, в 1980 г. — 70 МПа, в 1990 г. — 100 МПа, в 1995 г. — 200 МПа [11]. Из высокопрочного бетона и железобетона построены уникальные сооружения, рассчитанные на эксплуатацию не на одно столетие. Так, в Москве в 1963—1967 гг. была установлена Останкинская телевизионная башня высотой 537 м, железобетонная часть которой составляет 380 м, в США в 1976 г. построен дом в 79 этажей, в Малайзии — две башни высотой более 100 этажей из бетона класса В80. В Северном море в 1995 г. норвежские специалисты создали платформу по добыче нефти высотой 472 м на участке моря глубиной более 300 м, в 1986 г. в Канаде — мост «Анасис» с центральным пролетом 465 м, в 1998 г. в Европе — вантовый мост с пролетом 864 м, в Лиссабоне в 1998 г. — вантовый мост «Васко да Гама» с центральным пролетом 890 м [11]. Подобных примеров можно привести множество.

Долговечность железобетонных изделий и конструкций доказательно устанавливается в нормативных документах только до 100 лет, хотя практика их применения в уникальных сооружениях требует безаварийной эксплуатации в течение более длительных сроков.

По вопросам изучения поведения железобетонных конструкций и повышению их стойкости (сохранности) в агрессивных средах опубликовано множество работ. Долговечность железобетона в подавляющем большинстве случаев рассматривается для конкретных условий эксплуатации, и ее обоснование, как правило, носит описательный характер и редко оценивается аналитическими формулами.

В работе [4] автор предлагает оценивать долговечность (срок службы) бетона выражением (1), включающим следующие эмпирические коэффициенты:

$$Д = Д1 \cdot К1 \cdot К2 \cdot К3 \cdot К4 \cdot К5 \cdot К6 \cdot К7, \qquad (1)$$

где Д1 — стандартная долговечность бетона, 60 лет;
К1 — коэффициент качества цемента, от 0,5 до 1,8: К1 = 1,8 — для белитового портландцемента с удельной поверхностью до 3000 см^2/г; К1 = 0,5 — для высокоалюминатного портландцемента тонкомолотого с минеральными инертными и активными добавками;
К2 = (1,2—0,7) — качество и однородность сырья;
К3 = (1,2—0,7) — качество приготовления бетонной смеси;
К4 = (1,1—0,8) — условия транспортировки смеси и ее укладка в конструкцию;
К5 = (1,2—0,6) — условия твердения бетона;
К6 = (1,1—0,9) — качество ухода за бетоном при твердении конструкции;
К7 = (1,1—0,9) — однородность бетона и режим работы конструкции.

С учетом всех условий по верхней границе, что характерно для бетона класса В50 и марок по морозостойкости и водонепроницаемости соответственно F500 и W10—W16, долговечность железобетона может составить 270 лет.

Эмпирическая формула (2), близкая по структуре описанной выше и приведенная в той же работе, была предложена в Японии [4]:

$$Y = Y1 \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F \cdot G \cdot H, \qquad (2)$$

где Y1 — стандартная долговечность бетона, 60 лет;
A — коэффициент вида бетона: A = 1,0 — для обычного тяжелого бетона и A = 0,85 — для легкого бетона;
B — вид цемента: B = 1,0 — для портландцемента и B = 0,85 — для шлакопортландцемента;
C — величина водоцементного отношения: C = 1,0 — для В/Ц = 0,65 и C = 1,5 — для В/Ц = 0,55;
D — толщина защитного слоя для арматуры: D = 1,0 — при величине защитного слоя 40 мм, D = 1,56 — при 50 мм и D = 0,25 — при 20 мм;
E — вид отделки (защиты поверхности): E = 0,65 — без отделки, E = 1,5 — при отделке раствором и E = 3,0 — при отделке плиткой;
F — метод строительства: F = 1,0 — обычное, F = 1,5 — качественное;
G — условия эксплуатации: G = 1,0 — при периодическом ремонте дефектов и мест разрушения;
H — внешние условия эксплуатации: H = 1,0 — обычные, H = 0,9 — холодные, H = 0,8 — прибрежные.

Если принять коэффициенты C = 2,5 (В/Ц = 0,35), Д = 1,0 (бетон относится к категории особо плотных), E = 1,5 (бетон особо плотный и не требует отделки раствором), а остальные — по верхней границе, т. к. это соответствует требованиям к материалам и технологии изготовления качественного бетона, то его сохраняемость составит 300 лет.

Следует иметь в виду, что японский подход к оценке срока службы относится к рядовому, массовому бетону. В нем не учтен рост прочности во времени, что положительно скажется на повышении долговечности железобетонных конструкций, находящихся в благоприятных гидротермальных условиях весьма длительное время. Во влагонасыщенной среде за счет не прекращающейся гидратации цемента бетон будет обладать весьма высокой плотностью и прочностью, в нем будет сохранена высокощелочная среда, защищающая стальную арматуру от коррозии.

В монографии [8] подробно рассмотрены вопросы коррозионной стойкости бетона и железобетона в различных агрессивных средах, приведены необходимые механические свойства и вещественные составы бетона, обеспечивающие длительную стойкость в этих условиях, результаты обширных исследований, внедрение которых осуществлено в практику изготовления конструкций и изделий. Автором обоснованы требования к материалам для бетона, к показателям его качества по прочности и долговечности, реализация которых гарантирует длительную сохраняемость железобетонных конструкций в исправном состоянии.

В табл. 1 и 2 приведены расчетные сроки службы бетонов различных составов в зависимости от концентрации сульфата натрия в растворе на основании выполненных экспериментов [8]. Условия испытаний — полное погружение образцов в раствор сульфата натрия. Срок службы рассчитан по количеству поглощенных ионов сульфатов за 3 года испытаний образцов из растворной части бетона в слое толщиной 1 см.

***Таблица 1.** Срок службы бетона на сульфатостойком портландцементе в растворе сульфата натрия различной концентрации*

Концентрация сульфат иона, мг/л	Срок службы бетона, лет		
	В/Ц = 0,4 W8—W10	В/Ц = 0,32 >W20	В/Ц = 0,29 >W20
5 000	130	380	430
12 000	50	115	110
50 000	13	29	40

***Таблица 2.** Срок службы бетона на портландцементе Воскресенского завода*

Концентрация сульфат иона, мг/л	Срок службы бетона, лет		
	В/Ц = 0,4 W8—W10	В/Ц = 0,32 >W20	В/Ц = 0,29 >W20
5 000	100	145	370
12 000	25	40	35
50 000	7	6	8

Из результатов экспериментов следует, что срок службы зависит от вида цемента, концентрации сульфат ионов (агрессивного раствора), плотности бетона, которая интегрально характеризуется водоцементным отношением, и его водонепроницаемости.

Отмечается, что при прочих равных условиях у бетона на сульфатостойком портландцементе ожидается наибольший срок службы. Бетоны на портландцементе с добавкой суперпластификатора (в книге [8] приведен С-3) и микрокремнезема (МК) аналогичны по сроку службы.

Из табл. 1 и 2 следует, что главное в формировании плотной структуры и, следовательно, длительных сроков службы — низкое водоцементное отношение (В/Ц). При правильном подборе состава бетона оно обеспечивает высокую водонепроницаемость за счет формирования малой и очень «тонкой» пористости.

В публикации [8] приведены также расчетные сроки службы цементно-песчаной смеси в растворе сульфата натрия концентрации 10 000 мг/л на примере четырех разновидностей цемента: Вольского сульфатостойкого, портландцементов Воскресенского, Топкинского и Михайловского цементных заводов.

Испытывались растворы без добавок, с добавкой суперпластификатора С-3, микрокремнезема и суперпластификатора С-3, водоцементное отношение принималось 0,38; 0,40 и 0,43. Испытанные составы фактически представляли собой растворную часть бетона классов В45—В55.

Положительные результаты по долговечности показали цементно-песчаные растворы на сульфатостойком портландцементе с добавкой С-3 и с добавкой МК и С-3. В первом случае прогнозируется срок службы 500 лет, во втором — 810 лет.

При описании срока службы бетона до 500 — 810 лет не обсуждался такой фактор, относящийся к условиям захоронения радиоактивных отходов 2 класса в железобетонных контейнерах НЗК-150-1,5П, как постоянное нахождение контейнеров в стоячей воде. В этих условиях карбонизация бетона исключается [2, 8], цемент в нем будет постоянно и непрерывно гидратироваться, прочность медленно возрастать, пористость уменьшаться, защитные свойства от коррозии арматуры возрастать [2]. Этот процесс («бесконечно» долгое нахождение контейнера в практически стоячей неагрессивной воде за счет ограждающих конструкций и бентонитовой засыпки) также должен продлить срок службы контейнеров в дополнение к тем значениям, которые названы выше.

В работе [4] приведены расчеты прогноза срока службы бетона японскими учеными. По их результатам, современный уровень технологии производства бетона позволяет достичь срока службы до 500 лет. Отмечается также, что они обладают надежными защитными свойствами от коррозии металлической арматуры.

В другой публикации японского специалиста (Okad K. Durability of concrete constructions // Cement and Concrete, 1986, no. 470), приведенной в работе [2], отмечается, что **срок службы обычного бетона в неагрессивной среде не имеет предела.** Имеется в виду, что его качественные показатели адекватны среде и условиям эксплуатации конструкции или изделия.

Характеристика базового контейнера и конструкционного материала НЗК-150-1,5П

Контейнер железобетонный защитный невозвратный для твердых и отвержденных радиоактивных отходов типа НЗК, условное обозначение НЗК-150-1,5П, выпускаемый по техническим условиям Л.65.555.00.00.000, предназначен для размещения, кондиционирования, транспортирования, длительного хранения и захоронения твердых и отвержденных очень низкоактивных, низкоактивных и среднеактивных удаляемых РАО.

Экспериментальными, расчетными и аналитическими исследованиями была определена и обоснована долговечность контейнера — не менее 300 лет.

В табл. 3 и 4 представлены основные характеристики данного контейнера и конструкционного материала.

Таблица 3. Массогабаритные характеристики НЗК-150-1,5П

Характеристика	Показатель
Высота, мм	1375
Ширина, мм	1650
Длина, мм	1650
Минимальная толщина стенок (без учета металлического вкладыша), мм	150
Минимальная толщина крышки (без учета металлического вкладыша), мм	150
Минимальная толщина днища (без учета металлического вкладыша), мм	150
Емкость контейнера, м^3	1,5
Масса порожнего контейнера с крышкой (пробкой, вкладышем), т, ± 4 %	4,5—4,7
Масса НЗК с РАО с учетом первичных упаковок (не более), т	7,6—8,5
Количество ярусов при штабелировании, шт.	6—8 в зависимости от массы упаковки

Таблица 4. Характеристика конструкционного материала

Характеристика	Показатель
Прочность на сжатие, МПа	68—75
Прочность на осевое растяжение, МПа	3,5—4,2
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	7,0—8,0
Модуль упругости, МПа	4 100—4 500
Предельная деформация при сжатии	$2{,}4 \cdot 10^{-3}$—$2{,}5 \cdot 10^{-3}$
Морозостойкость исследованных бетонов	более F400
Водонепроницаемость образцов бетонов	более W14
Коэффициент диффузии ^{137}Cs в бетоне при влагонасыщении от 5 до 8 %	менее $1{,}0 \cdot 10^{-12}$ м^2/с

Требования к упаковкам РАО 2 и 3 класса

Основные различия в требованиях к упаковкам РАО 2 и 3 классов обусловлены уровнями активности РАО (табл. 5) и сроками сохранения упаковками изолирующих свойств (табл. 6).

Таблица 5. Характеристика РАО 2 и 3 классов (для целей захоронения)

Класс	Категория отходов	Удельная активность, Бк/г			
		Тритий	β-излуч. нуклиды	α-излуч. нуклиды	ТУЭ
1	Высокоактивные (тепловыделяющие)	$>10^{11}$	$>10^{7}$	$>10^{6}$	$>10^{5}$
2	Высокоактивные (до 100 Вт/м³)	$>10^{11}$	$>10^{7}$	$>10^{6}$	$>10^{5}$
2	Среднеактивные долгоживущие	от 10^{8} до 10^{11}	от 10^{4} до 10^{7}	от 10^{3} до 10^{6}	от 10^{2} до 10^{5}
3	Среднеактивные	от 10^{8} до 10^{11}	от 10^{4} до 10^{7}	от 10^{3} до 10^{6}	от 10^{2} до 10^{5}
3	Низкоактивные долгоживущие	от 10^{7} до 10^{8}	от 10^{3} до 10^{4}	от 10^{2} до 10^{3}	от 10^{1} до 10^{2}

Таблица 6. Требования к упаковкам для различных классов РАО

Требования	Класс РАО	
	2	3
Мощность дозы на поверхности, мГр/ч	не предъявляется	не более 10 мГр/ч
Механическая прочность при сжатии	не менее 10 МПа	не ниже требований к упаковке типа А, (не менее 5 МПа)
Скорость выхода радионуклидов из упаковки (массовая доля активности, вышедшей из упаковки РАО, за год)	не предъявляется	не более 10^{-2}/год для трития; не более 10^{-3}/год для β-, γ-отходов; не более 10^{-4}/год для α-отходов
Сохранение изолирующей способности упаковки РАО, лет	не менее 1000	не менее 100
Тепловыделение упаковки РАО	не более 100 Вт/м³	не предъявляется
Устойчивость к термическим циклам	сохранение прочности и изолирующих свойств после 30 циклов замораживания и оттаивания (−40...+40 °С)	сохранение прочности и изолирующих свойств после 30 циклов замораживания и оттаивания (−40...+40 °С)
Радиационная стойкость упаковки РАО	снижение прочности не более чем на 20 % от установленного предела при облучении дозой 10^{6} Гр или прогнозируемой дозой	снижение прочности не более чем на 20 % от установленного предела при облучении дозой 10^{6} Гр или прогнозируемой дозой

Особенностью отходов 2 класса является наличие в них долгоживущих радионуклидов, определяющих большие сроки их потенциальной опасности. Кроме того, отходы 2 класса подразделяются на две категории: высокоактивные, с ограниченным тепловыделением до 100 Вт/м³, и среднеактивные долгоживущие.

Этими особенностями обусловлены основные различия в требованиях к упаковкам 2 и 3 классов РАО, касающиеся требований к механической прочности и сохранению изолирующей способности.

Отличительной особенностью требований к упаковкам 2 и 3 классов, создающей проблему производства контейнера для кондиционирования РАО 2 класса, является период сохранения изолирующей способности упаковки, равный 1000 годам. Следует отметить, что этот срок не имеет ни научного, ни технико-экономического обоснования и оправдан только недостаточным знанием защитных свойств всех барьеров при реализации мультибарьерной концепции захоронения РАО.

Это чрезмерное требование сдерживает разработку и использование контейнеров для кондиционирования РАО 2 класса, с одной стороны, ввиду отсутствия методик обоснования долговечности упаковок в течение 1000 лет и, с другой стороны, из-за высокой стоимости.

Условия захоронения упаковок РАО 2 класса в глубинном пункте захоронения

В соответствии со стратегией захоронения [17] упаковки с РАО 2 класса будут размещаться в горных выработках (камерах) на глубине примерно 500 м в массиве водонепроницаемых гнейсов. Породы характеризуются высокой прочностью и низким коэффициентом фильтрации подземных вод.

Средняя минерализация подземных вод составляет примерно 350 мг/л, pH 7,5. Их усредненный состав указан в табл. 7 [18].

Таблица 7. Состав природных подземных вод Енисейского участка

Анион	Содержание		Катион	Содержание	
	моль/л	мг/л		моль/л	мг/л
Cl^-	$7{,}14\cdot10^{-4}$	25,0	Na^+	$1{,}40\cdot10^{-3}$	32,0
SO_4^{2-}	$1{,}62\cdot10^{-4}$	15,5	K^+	$1{,}15\cdot10^{-4}$	4,6
CO_3^-	$9{,}50\cdot10^{-5}$	5,7	Mg^{2+}	$4{,}94\cdot10^{-4}$	11,8
HCO_3^-	$3{,}2914\cdot10^{-3}$	200,0	Ca^{2+}	$1{,}21\cdot10^{-3}$	48,0

Из приведенных данных видно, что основными анионными компонентами подземной воды являются гидрокарбонаты, сульфаты и хлориды, а катионы представлены в основном кальцием, натрием и магнием.

О свойствах воды можно судить по данным табл. 8, которые говорят о том, что для условий Нижнеканского массива, относящегося к слабо фильтрующим грунтам, подземные воды можно охарактеризовать как неагрессивные для бетона. В противном случае эти вмещающие породы нельзя было бы отнести к благоприятным для размещения ПГЗРО.

Таблица 8. Основные признаки неагрессивной воды*

Показатель агрессивности	Сильно- и среднефильтрующие грунты, $K_ф$ > 0,1 м/сут	Слабо фильтрующие грунты, $K_ф$ < 0,1 м/сут
Бикарбонатная щелочность HCO_3, ммоль/л	более 1,4	не нормируется
Водородный показатель pH	более 6,5	более 5
Содержание свободной углекислоты CO_2, ммоль/л	менее 15	менее 55
Содержание магнезиальных солей (на ион Mg), мг/л	менее или равно 1000	менее или равно 2000
Содержание едких щелочей (на ионы K и Na), г/л	менее или равно 50 (для напорных сооружений менее или равно 30)	менее или равно 80
Содержание сульфатов (на ион SO_4), мг/л	менее 300 (для напорных сооружений менее 250)	менее 300
Содержание хлоридов, сульфатов, нитратов и других солей и едких щелочей при наличии испаряющих поверхностей, мг/л	менее 10 (для напорных сооружений по специальным указаниям)	менее 10

*В случае превышения показателей этой таблицы оценку агрессивности воды следует проводить в соответствии с требованиями СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85»

После заполнения камеры свободное пространство между контейнерами должно заполняться бентонитом или специально разработанным цементным раствором с целью создания гидроизолирующего барьера.

В течение нескольких лет или десятилетий после закладки камеры и ее герметизации произойдет восстановление гидравлического давления в зоне захоронения, которое может достигать 5 МПа.

Температура в камерах размещения упаковок с долгоживущими среднеактивными РАО 2 класса будет постоянной, в пределах от 30 до 50 °C, ввиду отсутствия тепловыделения у таких отходов. Влияние теплового поля высокоактивных отходов 1 класса будет ограничено из-за того, что их тепловое воздействие на защитный бентонитовый барьер должно быть ограничено температурой не более 90 °C, а расстояние между зонами захоронения ВАО и САО будет составлять не менее 10 метров коренной породы.

Анализ факторов воздействия на конструкционный материал контейнера НЗК-150-1,5П

Долговечность контейнера определяется его способностью сохранять рабочее состояние до наступления предельного срока, установленного нормативными требованиями. При захоронении он испытывает механические воздействия, влияние окружающей среды, отходов и продуктов их деградации. Долговечность контейнера будет определяться устойчивостью конструкционного материала — бетона — к внешнему воздействию.

К основным видам влияния на упаковку, сформированную на базе железобетонного контейнера типа НЗК, при захоронении относятся:
- карбонизация;
- морозное разрушение;
- коррозия бетона;
- биокоррозия бетона;
- коррозия стальной арматуры;
- радиационное воздействие;
- воздействие материалов радиоактивных отходов.

Рассмотрим последствия влияния различных факторов на долговечность бетона.

Карбонизация бетона

Ниже представлено описание сущности этого процесса, называемого карбонизацией бетона [6]. Углекислый газ, карбонаты и бикарбонаты, содержащиеся в подземных водах ПГЗРО, вступают в химическую реакцию с имеющимся в бетоне в свободном состоянии гидратом окиси кальция. Образуется прочное соединение — карбонат кальция, слой которого постепенно перемещается в глубину бетона. Глубина карбонизации зависит от его влажности и среды, в которой он находится, но в основном определяется его плотностью и проницаемостью. Карбонизация гидрата окиси кальция $Ca(OH)_2$ и образование карбоната кальция $CaCO_3$ протекают в плотном бетоне лишь в поверхностном слое.

Растворимость карбоната кальция при прочих равных условиях примерно в 100 раз ниже растворимости гидрата окиси кальция, поэтому карбонизация бетона приводит к значительному повышению его стойкости при развитии коррозии I вида.

В то же время карбонизация защитного слоя может привести к снижению щелочности бетона, окружающего арматуру (уменьшение водородного показателя pH с 12,5—13,5 до 7—8), и при его недостаточной плотности может привести к возникновению коррозии арматурной стали. Развитие процесса коррозии может явиться причиной появления трещин в защитном слое бетона и его разрушению.

Однако в условиях постоянного нахождения контейнеров в стоячей воде карбонизация бетона исключается, поскольку он будет постоянно и непрерывно гидратироваться, прочность будет медленно возрастать, пористость уменьшаться, защитные свойства от коррозии арматуры будут возрастать [2, 8].

Кроме того, в подводных сооружениях, постоянно находящихся в воде, коррозия стальной арматуры не происходит ввиду отсутствия кислорода [1, 2, 8].

Необходимо также учитывать то, что свободное пространство между контейнерами будет заполнено цементным раствором, который выполняет роль защитного барьера от проникновения подземных вод и карбонизируется в первую очередь, тем самым препятствуя поступлению опасных компонентов к стенкам контейнера.

Таким образом, карбонизация стенок бетона в условиях глубинного пункта захоронения РАО не является опасным фактором, который может привести к потере прочности контейнера.

Морозное разрушение

Морозостойкость бетона является одним из основных показателей, характеризующих его долговечность, которая зависит от ряда свойств: прочности цементного камня, растяжимости, но главными среди них являются степень насыщения и структура порового пространства цементного камня.

При захоронении упаковок с РАО 2 класса в ПГЗРО температура будет всегда положительная, что исключит фактор морозного разрушения.

Коррозия бетона

Различают три вида коррозии бетона.

Коррозия бетона 1-го вида

В первую группу могут быть объединены все те процессы коррозии, которые возникают в бетоне при воздействии вод с малой жесткостью, когда составные части цементного камня растворяются и уносятся протекающей водой.

Для прогноза долговечности бетона и количественной оценки интенсивности коррозии 1-го вида могут быть выполнены расчеты выщелачивания извести и допустимого коэффициента фильтрации воды или срока сохранения бетоном прочности при фильтрации воды через него или при омывании ею поверхности бетона.

Рассмотрим простейший способ подсчета срока службы бетонных и железобетонных конструкций при воздействии воды под напором для оценки степени опасности этого вида коррозии.

Алгоритм расчета долговечности бетона контейнера при условии действия коррозии 1-го вида представлен в табл. 9.

В качестве примера рассматривается ситуация, при которой контейнер с отходами помещается в грунт с потоком подземных вод, характеризующимся следующими параметрами: гидравлический уклон — 0,013 м/м, коэффициент фильтрации внешней среды — 730 м/год (супесь), скорость фильтрации — 9,49 м/год. Эти показатели свойственны грунтам площадки размещения Ленинградского отделения филиала «Северо-западный территориальный округ» ФГУП «РосРАО» и существенно уступают условиям, в которых будут размещаться упаковки с РАО 2 класса в глубинном пункте захоронения.

Расчеты выщелачиваемости извести, выполненные для бетона водонепроницаемостью W8 (консервативный подход) с коэффициентом фильтрации от $1\cdot10^{-10}$ до $6\cdot10^{-10}$ см/с, показали, что его срок службы без потери основных технических свойств составит от 1 300 до 8 000 лет.

***Таблица 9.** Алгоритм расчета долговечности бетона контейнера при условии действия коррозии 1-го вида*

Алгоритм расчета	Модель или формула расчета	Ограничения или значения параметров
1. Расчет количества воды, фильтруемой через стенку НЗК	$V = K_ф \cdot \Delta H/X$ $K_ф$ – коэффициент фильтрации; ΔH – гидравлический уклон; X – толщина стенки	ΔH – принимается как 0,013 м/м; X – 0,15 м
2. Расчет количества извести, которое может быть удалено	$Q = K \cdot Ц \cdot \acute{\alpha}$ K – процент выщелачивания CaO; Ц – содержание цемента в бетоне; $\acute{\alpha}$ – содержание CaO в цементе	K – принимается равным 10 %; Ц – принимается как 0,4 г/см^3; $\acute{\alpha}$ – для портландцемента может быть принято как 0,65
3. Расчет долговечности бетона стенок НЗК	$T = q/V \cdot C$ C – средняя концентрация извести в воде	C – принимается равной 1,2 г/л

Это свидетельствует о том, что при малой скорости фильтрации, которой характеризуется среда размещения контейнеров при захоронении, практически отсутствуют фильтрационные потоки воды в бетоне, и процесс выщелачивания извести, как показывают расчеты, практически не оказывает никакого воздействия на его срок службы.

Коррозия бетона 2-го вида

Второй вид коррозии — разрушение цементного камня водой, содержащей соли, способной вступать в обменные реакции с составляющими цементного камня. При этом образуются продукты, которые либо легкорастворимы, либо выделяются в виде аморфной массы, не обладающей связующими свойствами. В результате таких преобразований увеличивается пористость цементного камня и, следовательно, снижается его прочность.

С физико-химической точки зрения коррозия 2-го вида включает в себя следующие процессы:

- проникновение агрессивного вещества из раствора в пористую структуру бетона;
- химическое взаимодействие агрессивного вещества с компонентами цементного камня с образованием растворимых (или аморфных) продуктов;
- вынос растворимых продуктов реакции из бетона.

Наиболее часто встречающаяся при воздействии природных вод коррозия бетона — коррозия под действием углекислых вод. Кислота H_2CO_3 присутствует, как правило, во всех водах. Источником обогащения ею являются биохимические процессы, протекающие в воде и в почве. Необходимо отметить, что чем больше агрессивной H_2CO_3, тем выше кислотные свойства раствора и скорость коррозии.

Скорость коррозии 2-го вида определяется скоростью поступления углекислоты с подземными водами. При практическом отсутствии потока подземных вод и ее незначительном содержании этот вид коррозии не оказывает существенного влияния на долговечность бетона.

Коррозия бетона 3-го вида

К третьему виду коррозии относятся процессы, возникающие под действием сульфатов. В порах цементного камня происходит отложение малорастворимых веществ, содержащихся в воде, или продуктов их взаимодействия с его составляющими. Их накопление и кристаллизация в порах вызывают значительные растягивающие напряжения в стенках пор и приводят к разрушению цементного камня. Характерным видом его сульфатной коррозии является взаимодействие растворенного в воде гипса с трехкальциевым гидроалюминатом по уравнению (3):

$$3CaO \cdot A1_2O_3 \cdot 6H_2O + 3CaSO_4 + 25H_2O = \\ = 3CaO \cdot A1_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O \qquad (3)$$

При этом образуется труднорастворимый гидросульфоалюминат кальция, который, кристаллизуясь, поглощает большое количество воды и значительно увеличивается в объеме (примерно в 2,5 раза), что оказывает сильное разрушающее действие на цементный камень.

Исключить или ослабить влияние коррозионных процессов при действии различных вод можно конструктивными мерами, путем улучшения технологии приготовления бетона, а также применения цементов определенного минералогического состава и необходимого содержания активных минеральных добавок.

Сравнение ионного состава подземных вод (табл. 7) с показателями воды (табл. 8) позволяет говорить о неагрессивной среде для бетона и сделать вывод, что этот вид коррозии практически не влияет на долговечность контейнеров.

Коррозия стальной арматуры

Одной из причин повреждения железобетонных конструкций является коррозия стальной арматуры [2]. Надежным условием их длительного использования в первую очередь является защита арматуры от коррозии в соответствующих условиях эксплуатации. Эффективным средством для этого является ее размещение в бетоне высокого качества, т. е. сама железобетонная конструкция обеспечивает длительную сохранность стальной арматуры в бетоне, который обладает требуемыми показателями качества в конкретной агрессивной среде.

В подводных сооружениях, постоянно находящихся в воде, коррозия стальной арматуры не происходит ввиду отсутствия кислорода [1, 2, 8]. Как отмечалось выше, упаковки с РАО 2 класса будут размещаться в грунте на глубине около 500 м. После этого в горной выработке свободное пространство между упаковками и стенами будет заполнено бентонитовой смесью или специальным цементным раствором. Через какое-то время вся зона захоронения будет насыщена подземными водами, и ввиду их чрезвычайно малой скорости трансфер кислорода будет ограничен, что в сочетании с процессом карбонизации исключает коррозию стальной арматуры.

Биокоррозия бетона

Биокоррозия бетона, обусловленная действием агрессивной среды и микроорганизмов, является одним из наиболее важных факторов, вызывающих деградацию бетона.

К основным видам биокоррозии относятся бактериальная и грибковая. Из бактерий в коррозии цементного бетона участвуют нитрификаторы, тионовые, железо- и силикатные бактерии и др. Ответственными за грибковую коррозию являются мицелиальные грибы родов *Penicillium, Aspergillus, Trichoderma, Cephalosporium* [19].

Биоповреждения преимущественно сводятся к нарушению сцепления компонентов бетона в результате воздействия минеральных или органических кислот и ферментов, а также вследствие химических реакций между цементным камнем растворов и бетонов и продуктами жизнедеятельности микроорганизмов [20].

Долговечность цементных бетонов в условиях воздействия биологических сред во многом зависит от пористости материала, при увеличении которой увеличивается его проницаемость для микроорганизмов, что способствует снижению прочности композитов [19].

Одним из способов повышения стойкости бетона является введение в состав цементных композиций тонкодисперсного наполнителя — микрокремнезема. Эта добавка благоприятно влияет на структурообразование и пористость цементного камня. Микрокремнезем в основном состоит из аморфного кремнезема, который, взаимодействуя с гидроксидом кальция, способствует образованию дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция, что обуславливает уплотнение цементного камня [19].

Другим эффективным способом повышения биостойкости цементных материалов является снижение содержания пылевидных и глинистых частиц в щебне и мелком заполнителе — не более 1,0% (по массе), и введение в состав бетона фунгицидных добавок.

Надежный прогноз долговечности контейнеров с учетом влияния микроорганизмов на бетон можно сделать только при проведении масштабных модельных экспериментов в биологической зоне ПИЛ, включающих отбор проб и идентификацию локальной микрофлоры, проведение лабораторных экспериментов и натурных «*in situ*» экспериментов [21].

Радиационное воздействие

Радиационная стойкость характеризуется способностью материала сохранять свою структуру и свойства при воздействии радиационных нагрузок в период срока эксплуатации. При строительстве бассейнов выдержки и хранилищ для отработавшего ядерного топлива, обладающего мощным нейтронным и гамма-излучением, широко применяются цементные материалы [22].

В работе [23] отмечается, что при суммарной дозе до 190 МГр излучение не оказывает существенного влияния на свойства обычного бетона с плотностью 2 200—2 400 кг/м^3, как то: изменение массы, прочности при сжатии, модуль упругости, глубина карбонизации, распределение пор.

Радиолиз свободной и связанной воды с образованием свободного водорода не приведет к изменению свойств бетона, поскольку водород будет диффундировать через бетонную стенку за счет достаточной газопроницаемости.

Воздействие материалов радиоактивных отходов

Согласно требованиям к радиоактивному содержимому [24] в отходах не должны содержаться вещества, способные взрываться, реагировать с водой с выделением самовоспламеняющихся или воспламеняющихся газов или образующих с воздухом или другими веществами токсичные газы, аэрозоли или возгоны, включать инфицирующие вещества. Присутствие легковоспламеняющихся и самовозгорающихся и комплексообразующих веществ допускается не более 1% от массы радиоактивного содержимого упаковки. Свободной жидкости не должно быть более 3% от массы содержимого упаковки.

В числе среднеактивных отходов 2 класса могут быть: графит, металл, цементный компаунд. Эти отходы в полной мере соответствуют перечисленным требованиям, к которым необходимо добавить следующие ниже.

В составе отходов не должны содержаться вещества, вызывающие при взаимодействии с водой коррозию бетона 2-го и 3-го вида.

При заполнении свободного пространства контейнера наполнитель также не должен содержать этих веществ, взаимодействовать с бетонными стенками контейнера, а также создавать давление на стенки контейнера при заливке цементным раствором или при засыпке набухающим материалом.

При необходимости в бетонных контейнерах может устанавливаться металлическая вставка и/или на внутреннюю поверхность контейнера наноситься антикоррозионное покрытие.

Требования к бетону контейнеров для РАО 2 класса

На основании анализа выполненных исследований и опыта эксплуатации бетонных и железобетонных сооружений ниже предложены требования к материалу контейнеров, реализация которых может гарантировать их долговечность в течение нескольких столетий при захоронении в ПГЗРО НКМ.

Механические показатели качества:

- прочность на сжатие — класс B50 и выше;
- прочность на осевое растяжение — класс Bt2.4 и выше;
- модуль упругости бетона, Ex — 38 000 МПа и выше.

Остальные показатели — по СП 63.13330.2018 для бетона B50.

Физические показатели качества:

- водонепроницаемость — W20 и выше;
- средняя плотность — Д2400—Д2550 кг/м^3;
- морозостойкость — F300 и выше.

Требования к материалам:

Портландцемент класса ЦЕМ I 52,5, ГОСТ 31108-2016. Цемент сульфатостойкий ЦЕМ I 42,5 СС, ГОСТ 22266-2013.

Добавки для бетона:

- суперпластифицирующие и водоредуцирующие (обязательные);
- стабилизирующие сохраняемость и подвижность (рекомендуемые);
- снижающие проницаемость (рекомендуемые);
- повышающие коррозионную стойкость — микрокремнезем, марки МК-85 или МКУ 85 (рекомендуемые).

Крупный заполнитель по ГОСТ 8267-93, ред. 2018 г.:

Щебень из плотных горных пород со средней плотностью от 2,65 до 3,0 г/см^3 с фракциями от 5 до 10 мм и от 10 до 20 мм или смеси фракций от 5 до 20 мм. Марка по дробимости щебня — «1200». Содержание пылевидных и глинистых частиц по массе — не более 1,0 %, содержание глины в комках — не более 0,25 % по массе. Вредных компонентов и примесей не допускается.

Мелкий заполнитель по ГОСТ 8736-2014, ред. 2019 г.:

Песок класса I, группа песка: крупная, средняя.

По остальным показателям качества песок должен соответствовать требованиям стандарта для песка класса I и указанной выше группы.

Обсуждение результатов

Проведенный краткий обзор исследований по долговечности бетона показал, что современные технологии позволяют изготавливать его для строительства ответственных зданий и сооружений с назначенным сроком эксплуатации до 500 лет.

Рассмотренные гидрогеологические условия ПГЗРО НКМ показывают, что они не являются агрессивными по отношению к бетону. Выполненный анализ отдельных наиболее важных факторов, влияющих на его долговечность, а также способность поддерживать высокий уровень pH в ближней зоне ПГЗРО на протяжении многих тысяч лет показал отсутствие причин для существенного снижения основных показателей качества конструкционного материала контейнеров при размещении упаковок РАО в ПГЗРО. Однако в настоящее время отсутствуют исследования комплексного влияния на бетон (впрочем, как и на другие материалы) в условиях ПГЗРО, к которым относятся совместное химическое, микробиологическое, тепловое и радиационное воздействие. Эти исследования необходимо провести в реальных условиях ПИЛ.

Для производства контейнеров, в максимальной степени отвечающих нормативным требованиям к упаковкам с РАО 2 класса, разработаны состав и технология получения бетона с характеристиками, гарантирующими сохранение защитных свойств в течение нескольких столетий. Определение реальных сроков его долговечности не представляется возможным ввиду отсутствия методик прогнозирования на столь длительные сроки.

В этой связи необходимо разработать методику обоснования надежности конструкционных материалов контейнеров для РАО 1 и 2 классов, а также целесообразно внести изменения в нормативную базу (НП-093-14) с установлением сроков сохранения защитных свойств, которые должны вытекать из анализа долгосрочной безопасности системы захоронения.

Литература

1. *Алексеев С. Н.* Коррозия и защита арматуры в бетоне. — М. : Стройиздат, 1988. 230 с.
2. *Алексеев С. Н., Иванов Ф. М., Модры С., Шиссль П.* Долговечность железобетона в агрессивных средах. — М. : Стройиздат, 1990. 320 с.
3. *Баженов Ю. М., Демьянова В. С., Калашников В. И.* Модифицированные высокопрочные бетоны. — М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. 368 с.
4. *Гордон С. С.* Прогноз долговечности железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. 1992. № 6. С. 23—25.
5. *Ли Ф. М.* Химия цемента и бетона. Пер. с англ. — М. : Госстройиздат, 1961. 645 с.
6. *Москвин В. М., Иванов Ф. М., Алексеев С. Н., Гузеев Е. А.* Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. — М. : Стройиздат, 1980. 536 с.
7. *Москвин В. М.* Коррозия бетона. — М. : Госстройиздат, 1952. 342 с.

8. *Розенталь Н. К.* Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости. — М. : ФГУП ЦПП, 2006. 520 с.
9. *Степанова В. Ф.* Долговечность бетона. — М. : АСВ, 2014. 126 с.
10. *Шестоперов С. В.* Долговечность бетона. — М. : Автотрансиздат, 1960. 512 с.
11. *Михайлов К. В., Хайдунов Г. К., Волков Ю. С.* К 150-летию изобретения железобетона (этапы истории с 1930 по 2000 г.) // Бетон и железобетон. 1999. № 5. С. 23—26.
12. *Батраков В. Г.* Модифицированные бетоны. Теория и практика. — М. : Стройиздат, 1998. 768 с.
13. *Батраков В. Г.* Модификаторы бетона: новые возможности и перспективы // Строительные материалы. 2006. № 10. С. 1—8.
14. *Розенталь Н. К., Степанова В. Ф., Чехний Г. В.* Бетоны высокой коррозионной стойкости и нормирование их характеристик // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2017. № 3—4 (218—219). С. 14—19.
15. *Фаликман В. Р., Степанова В. Ф.* Нормативные сроки службы бетонных и железобетонных конструкций и принципы их проектирования по параметрам долговечности // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 6. С. 13—22. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.13-22.
16. *Аистов В. Ф., Свиридов Н. В.* Особопрочный цементный бетон: свойства, область применения, эффективность: Российская архитектурно-строительная энциклопедия. Т. 9. С. 205—212.
17. *Крюков О. В.* Стратегия создания пункта глубинного захоронения РАО // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 114—120.
18. *Rozov K. B., Rumynin V. G., Nikulenkov A. M., Leskova P. G.* Sorption of ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{139}Se, ^{99}Tc, $^{152(154)}$Eu, $^{239(240)}$Pu on fractured rocks of the Yeniseysky site (Nizhne-Kansky massif, Krasnoyarsk region, Russia) // Journal of Environmental Radioactivity. 2018. no. 192. Pp. 513—523. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.08.001.
19. *Соломатов В. И., Ерофеев В. Т., Смирнов В. Ф. и др.* Биологическое сопротивление материалов. — Саранск : Изд-во Морд. ун-та, 2001. 196 с.
20. *Светлов Д. А., Качалов А. Н.* Микробиологическая коррозия строительных материалов // Транспортные сооружения. 2019. № 4. — URL: https://t-s.today/PDF/19SATS419 (дата обращения 01.02.2022).
21. *Сафонов А. В., Болдырев К. А.* Исследование биогенных процессов в ПИЛ ПГЗРО в Нижнеканском массиве // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 92—100. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-92-100.
22. *Дубровский В. Б., Аблевич З. А.* Строительные материалы и конструкции защиты от ионизирующих излучений. Под ред. В. Б. Дубровского. — М. : Стройиздат, 1983. 240 с.
23. *Дубровский В. Б.* Радиационная стойкость строительных материалов. — М. : Стройиздат, 1977. 58 с.
24. НП-093-14. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии.

Информация об авторах

Сорокин Валерий Трофимович, доктор технических наук, главный технолог, АО «Атомэнергопроект» (197183, Санкт-Петербург, ул. Савушкина, д. 82, лит. А), e-mail: vsorokin@atomproekt.com.

Гатауллин Рустам Мухтарович, доктор технических наук, генеральный директор, АО «345 МЗ» (143900, Московская обл., Балашиха, Западная промзона, ш. Энтузиастов, д. 7), e-mail: mail@345mz.ru.

Свиридов Николай Васильевич, доктор технических наук, АО «345 МЗ» (143900, Московская обл., Балашиха, Западная промзона, ш. Энтузиастов, д. 7), e-mail: mail@345mz.ru.

Павлов Дмитрий Игоревич, начальник технологического отдела по обращению с РАО, «Санкт-Петербургский филиал АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон — ВНИПИЭТ» (197183, Санкт-Петербург, ул. Дибуновская, д. 55), e-mail: dipavlov@eleron.ru.

Библиографическое описание статьи

Сорокин В. Т., Гатауллин Р. М., Свиридов Н. В., Павлов Д. И. Долговечность железобетонных контейнеров типа НЗК-150-1,5П при захоронении радиоактивных отходов 2 класса // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 37—49. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-37-49.

DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE CONTAINERS NZK-150-1.5 P DURING THE DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE CLASS 2

Sorokin V. T.[1], Gataullin R. M.[2], Sviridov N. V.[2], Pavlov D. I.[3]

[1]JSC Atomenergoproekt, Saint-Petersburg, Russia
[2]JSC "345 MZ", Balashikha, Moscow region, Russia
[3]Saint-Petersburg branch of JSC FCS&HT "SNPO "Eleron" — "VNIPIET", Saint-Petersburg, Russia

Article received on April 21, 2022

The article focuses on experimental, calculation and analytical basis demonstrating the durability of reinforced concrete NZK-150-1.5P containers designed for the deep disposal of intermediate long-lived class 2 radioactive waste in the Nizhnekanskiy rock mass (DDFRW NKM) and the associated challenges. The article shows that the regulatory framework should be updated to reduce the requirements specifying the time during which the packages have to maintain their protective properties in case of intermediate-level waste class 2 disposal.

Keywords: *radioactive waste, reinforced concrete container, durability, disposal, deep disposal facility.*

References

1. Alekseev S. N. *Korroziya i zashchita armatury v betone* [Corrosion and Protection of Reinforcement in Concrete]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1988. 230 p.
2. Alekseev S. N., Ivanov F. M., Modry S., Shissl' P. *Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnykh sredakh* [Durability of Reinforced Concrete in Aggressive Environments]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1990. 320 p.
3. Bazhenov Yu. M., Dem'yanova V. S., *Kalashnikov V. I. Modifitsirovannye vysokoprochnye betony* [Modified High-strength Concretes]. Moscow, Assotsiatsiya stroitel'nykh vuzov Publ., 2006. 368 p.
4. Gordon S. S. Prognoz dolgovechnosti zhelezobetonnyh konstrukcij [Forecasted Durability of Reinforced Concrete Structures]. *Beton i zhelezobeton — Concrete and Reinforced Concrete,* 1992, no. 6, pp. 23—25.
5. Lea F. M. *Himiya cementa i betona* [The chemistry of cement and concrete]. Moscow, Gosstroiizdat Publ., 1959. 335 p. (in Russian).
6. Moskvin V. M., Ivanov F. M., Alekseev S. N., Guzeev E. A. *Korroziya betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity* [Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete, Method Providing their Protection]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1980. 536 p.
7. Moskvin V. M. *Korroziya betona* [Concrete Corrosion]. Moscow, Gosstroiizdat Publ., 1952. 342 p.
8. Rozental' N. K. *Korrozionnaya stoikost' tsementnykh betonov nizkoi i osobo nizkoi pronitsaemosti* [Corrosion Resistance of Cement Concretes with Low and Very Low Permeability]. Moscow, FGUP TSPP Publ., 2006. 520 p.
9. Stepanova V. F. *Dolgovechnost' betona* [Durability of Concrete]. Moscow, ASV Publ., 2014. 126 p.
10. Shestoperov S. V. Dolgovechnost' betona [Durability of Concrete]. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1960. 512 p.
11. Mikhailov K. V., Khaidunov G. K., Volkov Yu. S. K 150-letiyu izobreteniya zhelezobetona (ehtapy istorii s 1930 po 2000 g.) [To the 150th anniversary since the invention of reinforced concrete (key milestones from 1930 to 2000)]. *Beton i zhelezobeton — Concrete and Reinforced Concrete,* 1999, no. 5, pp. 23—26.
12. Batrakov V. G. *Modifitsirovannye betony. Teoriya i praktika* [Modified concrete. Theory and practice]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1998. 768 p.
13. Batrakov V. G. Modifikatory betona: novye vozmozhnosti i perspektivy [Modified Concrete: New Opportunities and Perspectives]. *Stroitel'nye materialy — Construction Materials,* 2006, no. 10, pp. 4—7.
14. Rozental N. K., Stepanova V. F., Chekhniy G. V. Betony vysokoi korrozionnoi stoikosti i normirovanie ikh kharakteristik [Concretes of high corrosion resistance and regulation of their characteristics]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka — Building materials, equipment, technologies of the XXI century,* 2017, no. 3—4 (218—219), pp. 14—19.
15. Falikman V. R., Stepanova V. F. Normativnye sroki sluzhby betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsii i printsipy ikh proektirovaniya po parametram dolgovechnosti [Normative Service Life of Concrete and Reinforced Concrete Structures and Principles of Their Design Based on Durability Parameters]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo — Industrial and civil engineering,* 2019, no. 6, pp. 13—22. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.13-22.
16. Aistov V. F., Sviridov N. V. Osoboprochnyi tsementnyi beton: svoistva, oblast' primeneniya, ehffektivnost' [High-strength cement concrete: properties, scope, efficiency]. *Russian architectural and construction encyclopedia,* vol. 9, pp. 205—212.

17. Kryukov O. V. Strategiya sozdaniya punkta glubinnogo zakhoroneniya RAO [Strategy for the development of RW deep disposal facility]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2018, no. 2 (3), pp. 114—120.
18. Rozov K. B., Rumynin V. G., Nikulenkov A. M., Leskova P. G. Sorption of ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{139}Se, ^{99}Tc, $^{152(154)}$Eu, $^{239(240)}$Pu on fractured rocks of the Yeniseysky site (Nizhne-Kansky massif, Krasnoyarsk region, Russia). *Journal of Environmental Radioactivity,* 2018, no. 192, pp. 513—523. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.08.001.
19. Solomatov V. I., Erofeev V. T., Smirnov V. F. et al. *Biologicheskoe soprotivlenie materialov* [Biological resistance of materials]. Saransk, Mordovian University Publ., 2001. 196 p.
20. Svetlov D. A., Kachalov A. N. Mikrobiologicheskaya korroziyastroitel'nyh materialov [Microbiological corrosion of building materials]. *Transportnye sooruzheniya — Transportation Structures,* 2019, no. 4. — URL: https://t-s.today/PDF/19SATS419 (accessed on 01.02.2022).
21. Safonov A. V., Boldyrev K. A. Issledovanie biogennyh processov v PIL PGZRO v Nizhnekanskom massive [URL in the Nizhnekanskiy Massif: Studying Biogenic Processes under HLW Disposal Project]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2019, no. 2 (7), pp. 92—100. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-92-100.
22. Dubrovskii V. B., Ablevich Z. A. *Stroitel'nye materialy i konstruktsii zashchity ot ioniziruyushchikh izluchenii* [Building materials and structures providing protection against ionizing radiation]. Ed. V. B. Dubrovskii. Moscow, Stroiizdat Publ., 1983. 240 c.
23. Dubrovskii V. B. *Radiatsionnaya stoikost' stroitel'nykh materialov* [Radiation resistance of building materials]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1977. 258 p.
24. NP-093-14. *Kriterii priemlemosti radioaktivnykh otkhodov dlya zakhoroneniya* [Radioactive waste acceptance criteria for disposal]. Federal norms and rules in the field of atomic energy use.

Information about the authors

Sorokin Valery Trofimovich, Doctor of Engineering, Chief Technology, JSC Atomenergoproekt (82-A, Savushkina st., Saint-Petersburg, 197183, Russia), e-mail: vsorokin@atomproekt.com.

Gataullin Rustam Muhtarovich, Doctor of Engineering, general director, JSC "345 MZ" (7, Enthusiasts road, Western industrial zone, Balashikha, Moscow region, 143900, Russia), e-mail: mail@345mz.ru.

Sviridov Nikolai Vasilyevich, Doctor of Engineering, JSC "345 MZ" (7, Enthusiasts road, Western industrial zone, Balashikha, Moscow region, 143900, Russia), e-mail:mail@345mz.ru.

Pavlov Dmitriy Igorevich, Head of radioactive waste management department, Saint-Petersburg branch of JSC FCS&HT "SNPO "Eleron" — "VNIPIET" (55, Dibunovskaya st., Saint-Petersburg, 197183, Russia), e-mail: dipavlov@eleron.ru.

Bibliographic description

Sorokin V. T., Gataullin R. M., Sviridov N. V., Pavlov D. I. Durability of reinforced concrete containers NZK-150-1.5P during the disposal of radioactive waste class 2. *Radioactive Waste*, 2022, no. 3 (20), pp. 37—49. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-37-49. (In Russian).