



УДК 69.059.4

Анваров Б.Р. – инженер

E-mail: anvarov@mail.ru

Латыпов В.М. – доктор технических наук, профессор

Латыпова Т.В. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: stexpert@mail.ru

Анваров А.Р. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: anvarov@yandex.ru

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Адрес организации: 450080, Россия, г. Уфа, ул. Менделеева, д. 195

Долговечность железобетона в резервуарах чистой воды

Аннотация

В статье представлена классификация существующих типов резервуаров чистой воды, результаты обследования их технического состояния. Уточнен механизм коррозии железобетонных конструкций подводной части резервуаров, проведено сопоставление с механизмом коррозии конструкций надводной части. Определены значения средней скорости коррозии выщелачивания железобетонных конструкций резервуаров в зависимости от плотности бетона, на основании, которых осуществлен прогноз долговечности конструкций как эксплуатирующихся резервуаров, так и вновь возводимых.

Ключевые слова: долговечность железобетона, резервуары чистой воды, коррозия выщелачивания, карбонизация бетона, продукты коррозии арматуры.

Городская система водоснабжения представляет собой комплекс сооружений, включающий следующие объекты:

- водоприемные сооружения, при помощи которых осуществляется прием воды из природных источников;
- водоподъемные сооружения или насосные станции, подающие воду к местам ее очистки, хранения и потребления;
- сооружения для очистки воды;
- водопроводные сети для подачи воды к местам ее потребления;
- башни и резервуары чистой воды, играющие роль регулирующих и запасных емкостей в системе водоснабжения.

Основная часть конструкций этих сооружений традиционно выполняется в монолитном, сборном или сборно-монолитном железобетоне.

Опыт эксплуатации систем водоснабжения свидетельствует о том, что наибольшее число отказов из-за снижения долговечности конструкций характерно для емкостных сооружений – резервуаров чистой воды, следствием чего являются сверхнормативные потери воды из-за нарушения герметичности резервуаров.

Согласно [1], нормативный срок службы резервуаров чистой воды составляет 40 лет; согласно [2] срок службы железобетонных конструкций при данной слабоагрессивной окружающей среде (действие чистой воды на железобетонные конструкции) равен 50 годам. Для большей части существующих резервуаров в настоящее время сроки эксплуатации превышают нормативные сроки, и, как следствие, возникают проблемы с эксплуатацией резервуаров – образование трещин в железобетонных конструкциях и нарушение герметичности, а также высокий физический износ конструкций по критерию долговечности. В связи с этим возникает вопрос об остановке работы таких резервуаров, однако с точки зрения больших затрат на строительство и пуск новых объектов целесообразно сохранение существующих резервуаров при регулярном проведении освидетельствования их технического состояния с соблюдением рекомендаций по дальнейшей эксплуатации.

В таблице 1 представлены наиболее распространенные конструктивные схемы существующих резервуаров чистой воды, а в таблице 2 – результаты обследования их технического состояния, проведенного авторами в последние годы. Отметим, что

железобетонные колонны в резервуарах являются наиболее подверженными действию чистой воды – со всех четырех сторон, в отличие от днища и стен, вступающих в контакт с водой лишь с одной стороны. В связи с этим глубина нейтрализации бетона определялась для колонн.

Таблица 1

Классификация существующих типов резервуаров

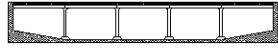

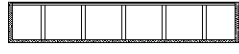
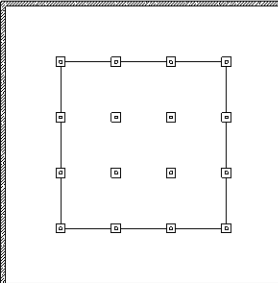
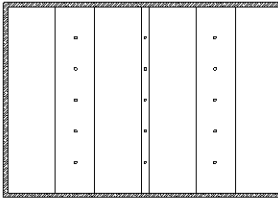
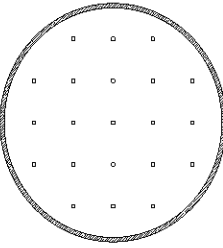
Тип резервуара	Тип I	Тип II	Тип III
Конфигурация	Прямоугольный	Прямоугольный	Цилиндрический
Вертикальный разрез			
План стен и колонн			
Типовой проект	ТП 901-04-63.83. Резервуары для воды прямоугольные сборные емкостью 50-20000 м ³	Индивидуальный проект Емкость 3000 м ³	ТП 901-04-63.86. Резервуары для воды цилиндрические железобетонные монолитные вместимостью от 50 до 500 м ³
Возможные варианты исполнения	<u>Сборно-монолитный:</u> – монолитные конструкции: днище, стены; – сборные конструкции: колонны, стеновые панели, балки покрытия, плиты покрытия	<u>Монолитный:</u> – монолитные конструкции: днище, стены, колонны, балки покрытия, покрытие	<u>Монолитный:</u> – монолитные конструкции: днище, стены, колонны, балки покрытия, покрытие

Таблица 2

Результаты обследования резервуаров

Тип резервуара (по таблице 1)	I	I	I	I	III	II	III	II	
Объем, м ³	3000	6000	5000	10000	500	3000	3000	3000	
Срок службы, лет	30	30	40	40	56	54	65	70	
Марка бетона по водонепроницаемости	W4	W4	W4	W4	W4	W2	W2	W2	
Глубина нейтрализации бетона колонн, мм	В под-водной части	5-6	5-6	9-10	9-10	10-12	14-15	16-17	18-20
	В над-водной части	–	–	9-10	–	10-11	–	15-16	–

Обследование резервуаров проведено согласно нормативу [3], в котором техническое состояние железобетонных конструкций оценивается по четырем категориям: 1 – аварийное, 2 – ограниченно-работоспособное, 3 – работоспособное, 4 – нормативное.

По результатам обследования установлено, что во всех резервуарах имеются дефекты и повреждения, однако все они являются ремонтпригодными. С целью осуществления прогноза долговечности конструкций резервуаров необходимо было провести исследования по двум направлениям: уточнить механизм коррозии и оценить скорость деструктивных процессов.

Механизм коррозии. По результатам обследования установлено, что механизм повреждения железобетонных конструкций в надводной и подводной части резервуара принципиально отличается. В надводной части повреждение происходит из-за карбонизации бетона (что приводит к снижению его щелочности) и последующей коррозии арматуры с образованием локализованных на ее поверхности продуктов коррозии («красной» ржавчины), увеличение которых в объеме создает в бетоне внутренние напряжения, что приводит к образованию трещин в защитном слое бетона (направленных вдоль арматурных стержней) и отслоению этого слоя (рисунок 1, таблица 3).

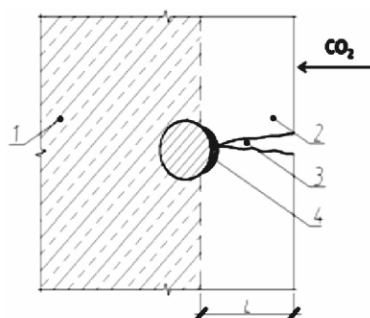


Рис. 1. Механизм разрушения бетона и коррозия арматуры в надводной части резервуаров чистой воды:

- 1 – неповрежденный бетон; 2 – карбонизированный слой бетона;
3 – трещина в защитном слое бетона; 4 – продукты коррозии арматуры;
L – глубина карбонизации бетона

Таблица 3

Зависимость ширины раскрытия трещин в защитном слое бетона от глубины коррозии арматуры

Ширина раскрытия трещины, мм	Глубина коррозии стали (мкм), по данным А.И. Васильева [4]	Глубина коррозии стали (мкм) по данным К. Andrade [5]
0,05	21	15-50
0,1	42	15-50
0,2	83	100-300
0,3	125	100-300
0,5	251	~300
1,0	502	~300

В подводных конструкциях снижение щелочности бетона происходит из-за растворения компонентов цементного камня (коррозия 1 вида), однако депассивация и коррозия стали протекает здесь в условиях ограниченного доступа кислорода (рисунок 2).

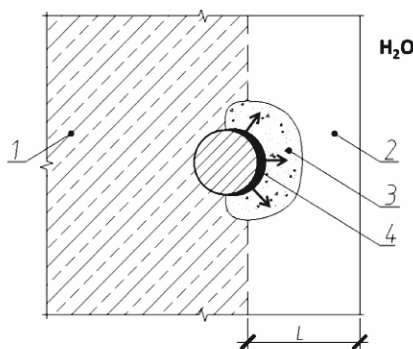


Рис. 2. Механизм разрушения бетона и коррозия арматуры в подводной части резервуаров чистой воды:

- 1 – неповрежденный бетон; 2 – нейтрализованный слой бетона;
3 – область бетона, насыщенного продуктами коррозии арматуры;
4 – продукты коррозии арматуры; L – глубина нейтрализации бетона

Это приводит к тому, что, во-первых, образуется так называемая «черная» ржавчина, а, во-вторых, продукты коррозии стали не локализируются только на поверхности арматуры, но и успевают продиффундировать глубоко в структуру бетона (вследствие малой скорости поступления кислорода). В результате распорный эффект на защитный слой бетона существенно снижается и на поверхности конструкций отсутствуют какие-либо трещины даже при глубине коррозии арматуры в 1...2 мм, что в десятки раз превышает данные по глубине коррозии арматуры при карбонизации бетона (таблица 3).

Таким образом, при отсутствии внешних признаков повреждения подводных конструкций (за исключением «шелушения» поверхностного слоя бетона и обнажения заполнителя), состояние арматуры может быть неудовлетворительным из-за начавшейся ее коррозии. Необходимо отметить, что снижение несущей способности конструкций происходит при этом не только за счет уменьшения сечения арматуры, но и вследствие ухудшения ее анкеровки в бетон из-за появления слоя «смазки» в виде продуктов коррозии стали.

По данным рентгенофазового анализа, состав продуктов коррозии стали в подводных и надводных конструкциях существенно отличается: если в надводной части преобладает оксигидроксид железа $\text{FeO}(\text{OH})$, то в подводной части наибольшая доля продуктов коррозии представлена гидроксидом железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (рисунок 3). Эти различия в фазовом составе, по-видимому, и определяют различия в цвете продуктов коррозии и возможности реализации распорного эффекта, сопровождающегося образованием трещин в защитном слое бетона. Отметим, что различия в фазовом составе продуктов коррозии обусловлены, в первую очередь, ограничением доступа кислорода к подводным конструкциям.

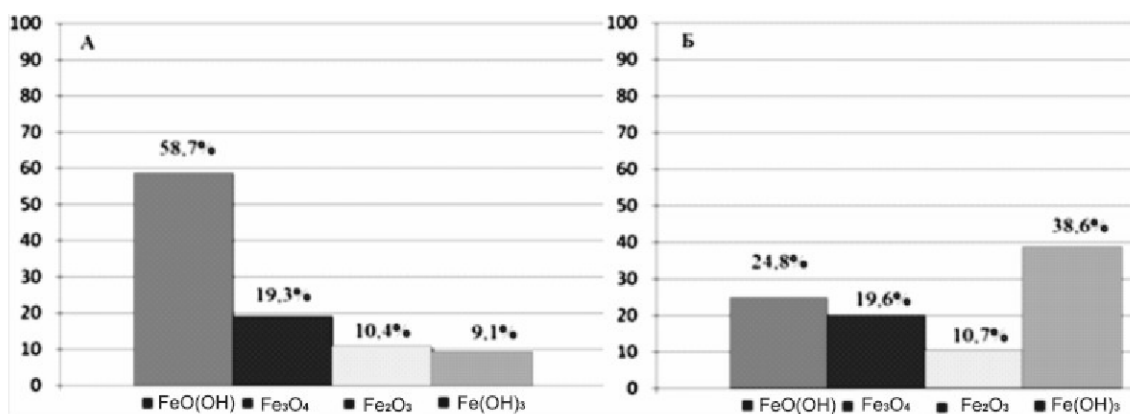


Рис. 3. Результаты рентгенофазового анализа продуктов коррозии арматуры в надводной (А) и подводной (Б) части резервуаров

Оценка скорости нейтрализации бетона. Из данных таблицы 2 следует, что глубина карбонизации надводных конструкций и глубина нейтрализации подводных конструкций сопоставимы по величине. Это позволяет сделать вывод о том, что необходимо учитывать опасность коррозионного износа подводных конструкций, несмотря на отсутствие внешних признаков повреждения конструкций, при изучении кинетики коррозионного процесса [6].

На основании полученных при обследовании данных была построена зависимость константы скорости коррозионного процесса при выщелачивании от плотности бетона (рисунок 4, прямая 2). Константа скорости коррозии K определялась по формуле (1):

$$L = \sqrt{KT}, \quad (1)$$

где L (глубина нейтрализации бетона колонн) и T (срок службы резервуара) – величины, принятые по данным таблицы 2.

В таблице 4 приведены полученные значения константы скорости коррозии K для бетонов с маркой по водонепроницаемости W_2 и W_4 , а также расчетные данные для бетона W_6 , что позволяет осуществить прогноз глубины нейтрализации железобетонных конструкций подводной части при строительстве новых резервуаров на различные сроки эксплуатации с применением бетона марки по водонепроницаемости W_6 .

Таблица 4

Значения констант скорости коррозии K для бетонов с W2, W4, W6

Водопоглощение, % по массе	Марка по водонепроницаемости, W	Водоцементное отношение, В/Ц	Константа скорости коррозии, K
св. 5,7	2	0,66-0,69	3,6; 4,4; 5,1
4,7-5,7	4	0,54-0,57	1,2; 2; 2,6
4,2-4,7	6	0,5	0,8

Прямая 1, представленная на рисунке 4, описывает зависимость константы скорости коррозии от плотности бетона по данным, полученным А.Ф. Полаком и В.В. Яковлевым расчетным путем [7]. Прямое определение константы коррозионного процесса при выщелачивании требует чрезвычайно большого времени, в связи с чем данная задача решалась методом оценки агрессивности жидких кислых сред по отношению к бетону. На основании использования данного метода были вычислены константы процесса выщелачивания бетона с различным водоцементным фактором. Для бетона с В/Ц=0,4 значение константы K – 5,5 мм²/год, с В/Ц=0,5 значение K – 7,4 мм²/год [7]. Следует отметить, что условия, принятые авторами работы [7] при расчете, весьма жесткие и на практике могут встречаться редко.

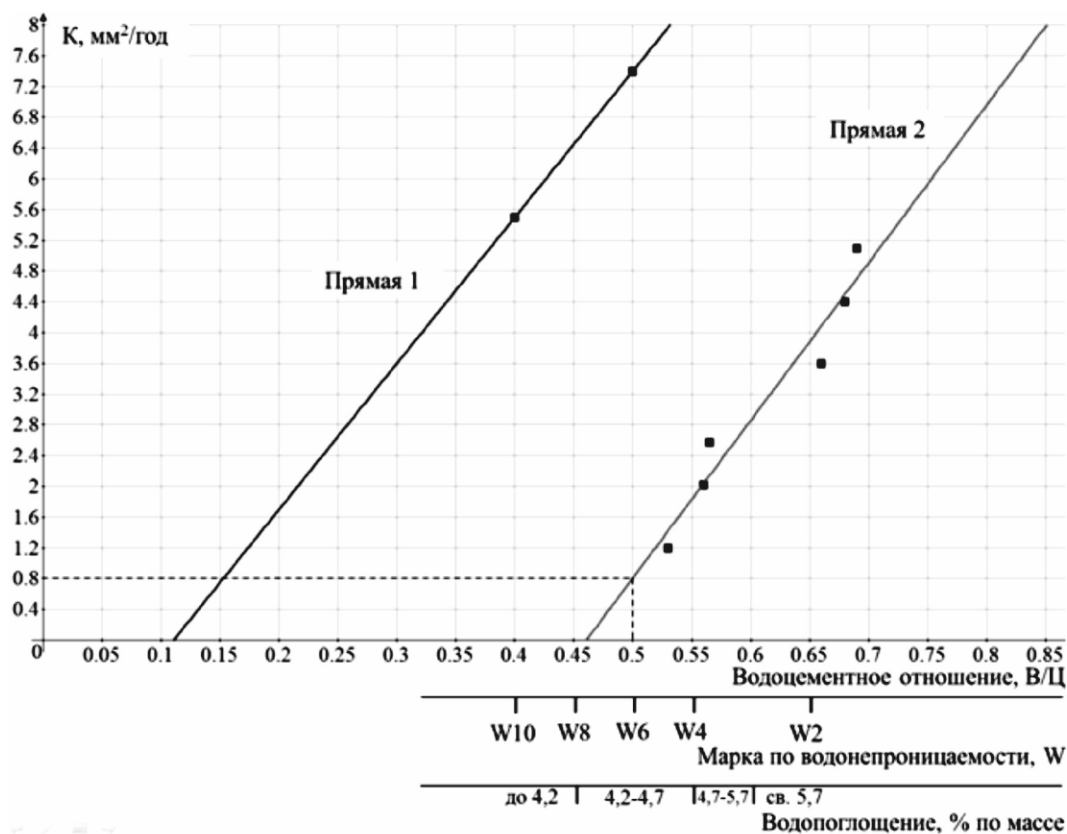


Рис. 4. Зависимость константы скорости коррозии от плотности бетона:
 прямая 1 – по расчетным данным А.Ф. Полака и В.В. Яковлева [7];
 прямая 2 – по данным натурных исследований

В реальных условиях скорость растворения будет значительно ниже (рисунок 3, прямая 2, полученная нами по данным натурных исследований) вследствие следующих причин:

– наличие сопутствующего процесса карбонизации бетона вследствие имеющихся в воде растворенных карбонатов. Этот процесс приводит к уплотнению порового пространства бетона и к уменьшению эффективного коэффициента диффузии гидрооксида кальция;

– наличие в омывающей бетон воде ионов, снижающих растворимость исходного материала. К ним относятся ионы, входящие в состав растворяющейся цементной связки (в частности, ионы кальция) [7].

На рисунке 5 представлена зависимость глубины нейтрализации бетона колонн L от срока службы резервуаров для бетона колонн с маркой по водонепроницаемости W2 и W4, полученные на основании натуральных исследований, а также прогнозируемая глубина нейтрализации бетона W6 для различного срока службы резервуаров.

При изготовлении железобетонных конструкций важным параметром с точки зрения долговечности является толщина защитного слоя бетона, и согласно [8], значения действительных отклонений толщины защитного слоя бетона до рабочей арматуры при изготовлении конструкций не должны превышать предельных значений. Таким образом, толщина защитного слоя бетона даже для конструкций, изготовленных с учетом соблюдения всех технологических требований, может быть значительно меньше предусмотренных в [9] значений, т.е. в назначении толщины защитного слоя бетона данный норматив не учитывает возможные минусовые отклонения по толщине защитного слоя при изготовлении конструкций, в результате чего фактическая толщина защитного слоя может быть меньше проектной.

Для железобетонных колонн исследованных резервуаров чистой воды (при линейных размерах поперечного сечения конструкции или ее элемента свыше 300 мм) данное предельное отклонение составляет от -5 до +15 мм и представлено на рисунке 5.

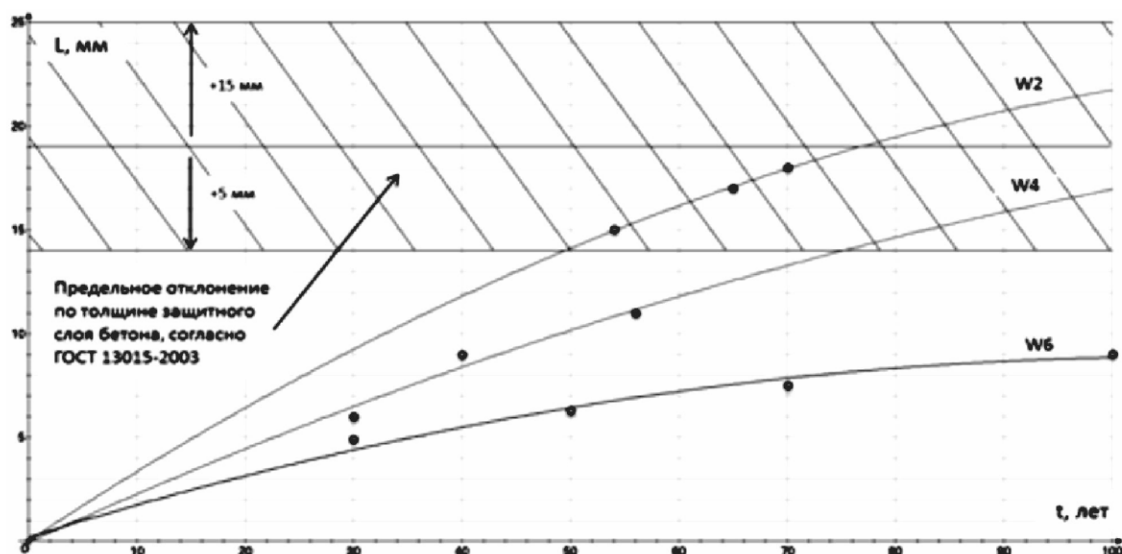


Рис. 5. Зависимость глубины нейтрализации бетона колонн L от срока службы резервуаров T

Данные рисунка 5 свидетельствуют о том, что для нового строительства при соблюдении требований по минимальной толщине защитного слоя бетона, долговечность железобетонных конструкций, находящихся в подводной части резервуаров чистой воды, будет составлять 70 лет при использовании бетона с маркой по водонепроницаемости W4 и более 100 лет для бетона с W6 без применения мер вторичной защиты бетона.

Для прогнозирования долговечности конструкций обследованных резервуаров, с учетом данных рисунка 5, проведен анализ для двух обследованных резервуаров, имеющих наименьший срок службы – 30 лет и наибольший – 70 лет. Эти данные представлены в таблице 5.

Таблица 5

Категории технического состояния строительных конструкций резервуаров

	Железобетонные конструкции	Категории технического состояния			
		На момент обследования		Прогноз на 10 лет	
		30 лет	70 лет	30 лет	70 лет
Надводная часть	Плиты	3	2	3	1
	Балки	3	2	3	1
	Стены	3	2	3	2
	Колонны	3	2	3	2
Подводная часть	Стены	3	2	3	2
	Днище	3	2	3	2
	Колонны	3	2	3	1

Данные представленные в таблице 5, свидетельствуют о том, что через десятилетний срок эксплуатации техническое состояние строительных конструкций резервуара со сроком службы 70 лет значительно ухудшится, причем это касается не только надводных, но и подводных конструкций, что необходимо учитывать при оценке возможности дальнейшей эксплуатации резервуара.

Список литературы

1. О единых нормах амортизационных отчислений на полное восстановление основных фондов народного хозяйства СССР. Резервуары чистой воды. – Постановление СМ СССР № 1072 от 22.10.90 г.
2. ГОСТ 31384-2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. – М.: Стандартинформ, 2010. – 44 с.
3. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М.: Стандартинформ, 2010. – 58 с.
4. Васильев А.И. Оценка коррозионного износа рабочей арматуры в балках пролетных строений автодорожных мостов // Бетон и железобетон, 2000, № 2. – С. 20-23.
5. Andrade K. and oth. Cover Cracking and Amount of Rebar Corrosion // Concrete repair, Rehabilitation and Corrosion. London, 1996. – P. 263-273.
6. Анваров Б.Р., Анваров А.Р., Латыпов В.М. Механизм коррозии железобетонных конструкций резервуаров чистой воды в подводной и надводной частях // Статьи и тезисы «III Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Водоснабжение, водоотведение и системы окружающей среды». – Уфа: УГНТУ, 2012. – С. 269-271.
7. Полак А.Ф., Яковлев В.В. Кинетика коррозии бетона в агрессивных средах // Строительные конструкции и материалы. Защита от коррозии. – Уфа: НИИПромстрой, 1980. – С. 112-119.
8. ГОСТ 13015-2003. Изделия железобетонные и бетонные для строительства. – 24 с.
9. СП 28.13330.2012. Защита строительных конструкций от коррозии. – М., 2012. – 76 с.

Anvarov B.R. – engineer

E-mail: anvarov@mail.ru

Latypov V.M. – doctor of technical sciences, professor

Latypova T.V. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: stexpert@mail.ru

Anvarov A.R. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: anvarov@yandex.ru

Ufa State Petroleum Technological University

The organization address: 450080, Russia, Ufa, Mendeleev str., 195

Durability of reinforced concrete in water supply systems

Resume

Classification of existing types of pure tanks, results of inspection of their technical condition is presented in article. The main part of designs of these constructions is traditionally carried out in monolithic, precast or combined and monolithic concrete. By results of inspection it is established that in all tanks there are defects and damages, however all of them are maintainable.

According to the X-ray phase analysis the structure of products of corrosion of steel in underwater and surface designs significantly differs. Let's note that distinctions in phase structure of products of corrosion are caused first of all by restriction of access of oxygen to underwater designs.

Depth of carbonization of surface designs and depth of neutralization of underwater designs are comparable in size. It allows to draw a conclusion that it is necessary to consider danger of corrosion wear of underwater designs, despite the lack of external signs of damage of designs, when studying kinetics of corrosion process.

Values of average speed of corrosion of the first type of ferroconcrete designs of tanks depending on the concrete density on the basis of what the forecast of durability of designs, both being operated tanks, and again erected is carried out are defined.

Keywords: durability of reinforced concrete, pure tanks, corrosion of the first look, concrete carbonization, products of corrosion of fittings.

References

1. About uniform norms of depreciation charges on a complete recovery of fixed assets of a national economy of the USSR. Pure tanks. – Resolution № 1072 SM USSR of 22.10.90.
2. GOST 31384-2008. Protection of concrete and ferroconcrete designs against corrosion. – M: Standartinform, 2010. – 44 p.
3. GOST P 53778-2010. Buildings and constructions. I governed inspection and monitoring of a technical condition. – M.: Standartinform, 2010. – 58 p.
4. Vasilyev A.I. Assessment of corrosion wear of working fittings in beams of flying structures of road bridges // Concrete and reinforced concrete, 2000, № 2. – P. 20-23.
5. Andrade K. and oth. Cover Cracking and Amount of Rebar Corrosion // Concrete repair, Rehabilitation and Corrosion. – London, 1996. – P. 263-273.
6. Anvarov B.R., Anvarov A.R., Latypov V.M. The mechanism of corrosion of ferroconcrete designs of pure tanks in underwater and surface parts // Articles and theses «the III International scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists. Water supply, water disposal and environment systems». – Ufa: UGNTU, 2012. – P. 269-271.
7. Polak A.F., Yakovlev V.V. Kinetics of corrosion of concrete in hostile environment // Construction designs and materials. Protection against corrosion. – Ufa: Niipromstroy, 1980. – P. 112-119.
8. GOST 13015-2003. Products ferroconcrete and concrete for construction. – 24 p.
9. SP 28.13330.2012. Protection of construction designs against corrosion. – M., 2012. – 76 p.