УДК 620.193:669.14-413 DOI: 10.33622/0869-7019.2020.10.31-38

Прогнозирование срока службы оцинкованных крепежных изделий в водопроводных колодцах

Николай Иванович СОТСКОВ, кандидат технических наук, доцент, зав. лабораторией исследования коррозии стали и защиты крепежа ОЭМ, e-mail: lisk-ns@mail.ru

ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», 117997 Москва, ул. Архитектора Власова, 49

Ольга Альбертовна МЕНЬЩИКОВА, гл. специалист Управления новой техники и системного управления, e-mail: menshikova@mosvodokanal.ru

АО «Мосводоканал», 105005 Москва, Плетешковский пер., 2

***Аннотация**. Приведены результаты исследования различных типов крепежных изделий с термодиффузионным цинковым покрытием в зависимости от мест установки и условий их эксплуатации в водопроводных колодцах г. Москвы. Проанализирован отечественный и мировой опыт применения различных видов крепежных изделий и антикоррозионных покрытий на водопроводных коммуникациях. Обобщение результатов выполненных исследований, ускоренных испытаний, а также анализ литературных источников позволили разработать математическую модель, описывающую коррозию крепежных изделий из углеродистой стали с термодиффузионным цинковым покрытием. Для разработки рекомендаций по применению различных типов крепежных изделий в зависимости от мест установки и условий эксплуатации в колодцах следует определить скорость коррозии крепежных изделий после двух лет эксплуатационных испытаний, торможение коррозии крепежных изделий благодаря дополнительной обработке выступающих частей крепежа специальными смазками после их монтажа, а также влияние контактной коррозии. Проведенные исследования дали возможность разработать методику прогнозирования срока службы новых типов крепежных изделий в зависимости от мест установки и условий эксплуатации.*

***Ключевые слова**: методика прогнозирования долговечности, термодиффузионное цинковое покрытие, крепеж, агрессивная среда, водопроводные колодцы, промышленная среда, скорость коррозии.*

FORECASTING THE SERVICE LIFE OF GALVANIZED FASTENERS IN WATER SUPPLY PITS

Nikolay I. SOTSKOV, e-mail: lisk-ns@mail.ru

Melnikov Central Research and Design Institute of Steel Structures, Arkhitektora Vlasova ul., 49, Moscow 117997, Russian Federation

Olga A. MENSHIKOVA, e-mail: menshikova@mosvodokanal.ru

Mosvodokanal, Pleteshkovskiy per., 2, Moscow 105005, Russian Federation

***Abstract**. The results of the study of various types of fasteners with thermal diffusion zinc coating depending on the installation locations and operating conditions in water supply pits in Moscow are presented. Domestic and international experience in the use of various types of fasteners and anticorrosive coatings on water utilities is analyzed. Generalization of the results of research, accelerated tests, and also analysis of literature sources made it possible to develop a mathematical model describing the corrosion of fasteners made of carbon steel with a thermo-diffusion zinc coating. To develop recommendations for the use of various types of fasteners, depending on the installation sites and operating conditions in water supply pits, it is necessary to determine the rate of corrosion of fasteners after two years of operational tests, the retardation of corrosion of fasteners due to additional treatment of protruding parts of fasteners with special lubricants after their installation, as well as the effect of contact corrosion. The research conducted made it possible to develop a methodology for predicting the service life of new types of fasteners, depending on the installation locations and operating conditions.*

***Key words**: method for durability prediction, thermo-diffusion zinc coating, fasteners, aggressive environment, water supply pits, industrial environment, corrosion rate.*

© СОТСКОВ Н. И., МЕНЬЩИКОВА О. А., 2020

Выбор материалов крепежных изделий, обеспечивающих герметичность фланцевых и раструбных соединений в течение всего срока эксплуатации, имеет особое значение при использовании долговечной запорно-регулирующей арматуры и трубопроводов из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ).

Опыт применения крепежа из низкосортных углеродистых сталей показал, что срок службы пары болт—гайка не превышает 10—15 лет при самых благоприятных условиях. Как правило, в течение пяти лет эксплуатации крепежные изделия, установленные в камерах и колодцах, требуют замены вследствие коррозионных разрушений. Большая часть крепежа (по разным оценкам от 15 до 30 %) выходит из строя в течение двух лет эксплуатации. Причины интенсивной коррозии — высокая влажность

воздуха в местах его установки, а также существенное солесодержание из-за попадания противогололедных реагентов, наличие конденсата на крепеже и наружных стенках трубопроводов и арматуры даже в теплый период года. Все эти факторы приводят к тому, что поверхность крепежных изделий постоянно покрыта концентрированным солевым раствором с высоким содержанием растворенного кислорода [1].

Цель исследования — разработка методики прогнозирования и рекомендаций по применению различных типов крепежных изделий с термодиффузионным цинковым покрытием в зависимости от мест установки и условий эксплуатации их в водопроводных колодцах г. Москвы.

Анализ отечественного и мирового опыта применения различных видов крепежных изделий и антикоррозионных покрытий на коммуникациях водопроводного хозяйства показал, что используют крепежные изделия: из углеродистой стали без антикоррозионного покрытия, с гальваническим цинковым и кадмиевым покрытием, реже с термодиффузионным цинковым покрытием, с цинконаполненным покрытием типа Dacromet, Delta-Magni, из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, 20Х13 и др. [2—5].

Начиная с 2008 г. в водопроводных колодцах районов по эксплуатации водопроводной сети (РЭВС) г. Москвы проводили натурные эксплуатационные испытания крепежных изделий, изготовленных из углеродистой стали с термодиффузионным цинковым покрытием. Параллельно на базе лаборатории ЦНИИПСК им. Мельникова выполняли ускоренные коррозионные испытания крепежных изделий из углеродистой стали с антикоррозионными покрытиями [6—9].

В колодцах РЭВС г. Москвы скорость коррозии крепежа в зависимости от химических, климатических и техногенных факторов различна. В настоящее время практически отсутствуют данные о сроках службы крепежа из стали разных марок, используемого в водопроводных сетях г. Москвы в агрессивной окружающей среде.

Основой для оценки скорости коррозии служат ГОСТ 9.039—74 «Коррозионная агрессивность атмосферы» и ГОСТ 9.040—74 «Металлы и сплавы. Расчетно-экспериментальный метод ускоренного определения коррозионных потерь в атмосферных условиях». В ГОСТ 9.039 коррозионная агрессивность атмосферы характеризуется увлажнением поверхности материалов и загрязнением воздуха коррозионно-активными агентами. Методики, изложенные в ГОСТ 9.040, позволяют оценить коррозионные потери объекта. Согласно ГОСТ 9.039 за увлажнение поверхности принимают увлажнение фазовыми и адсорбционными пленками. Однако применительно к крепежным изделиям в колодцах РЭВС сведения, содержащиеся в упомянутых стандартах, являются недостаточными. Это обусловлено тем, что помимо атмосферных факторов на крепеж воздействуют значительные статические нагрузки, высокие влажность воздуха и солесодержание вследствие попадания противогололедных реагентов, приводящие к сильному износу как самого крепежа, так и защитных покрытий. Наличие промышленных предприятий, искусственных и естественных водоемов, линий электропередачи, расположенных в непосредственной близости от колодцев РЭВС, также оказывает существенное коррозионное воздействие.

Таким образом, чтобы с достаточной достоверностью определить сроки службы крепежных изделий и выработать рекомендации по повышению их коррозионной стойкости, необходимо исследовать влияние атмосферных и других факторов на крепеж в условиях эксплуатации.

Сложность изучения процессов атмосферной коррозии и коррозии в солесодержащей воде заключается в учете множества факторов, действующих в течение длительных промежутков времени (в случае крепления запорно-регулирующей арматуры и трубопроводов — не менее 20 лет). Причем данные факторы изменяются во времени, продолжительность воздействия и их интенсивность во многих случаях неизвестны.

Поэтому наиболее эффективным является сочетание исследования образцов крепежа, прошедших различные сроки эксплуатации, и проведения ускоренных испытаний. Результаты ускоренных испытаний используют для создания математических моделей процесса коррозии. Сравнение результатов расчета и натурных испытаний позволит оценить адекватность построенной модели и разработать рекомендации по использованию крепежных изделий в запорно-регулирующей арматуре и трубопроводах в разных районах г. Москвы.

Методы испытаний и результаты исследований. На скорость коррозии металлов и сплавов оказывают влияние следующие факторы:

- время увлажнения поверхности металла фазовыми и адсорбционными пленками, причем наибольшая коррозия наблюдается при увлажнении фазовых пленок, возникающих в результате конденсации влаги на поверхности (роса) [10];
- агрессивные примеси в атмосфере (SO_2, SO_3, H_2S, HCl, Cl_2 и др.);
- агрессивные ионы в воде (Cl^- , SO_4^{2-} и др.);
- твердые примеси в виде пыли;

1. Основные характеристики исследуемых колодцев РЭВС[1]

Наименование региона, района, адреса и номер колодца	Время увлажнения в год, ч			Степень коррозионной агрессивности атмосферы	Влажностный режим и зона влажности	Среднегодовая температура, С° /влажность, %
	под фазовыми пленками	под адсорбционными пленками	суммарно			
Москва	2060	1050	3110	Слабоагрессивная	Нормально-влажностный	12,5[2]
Центральный, 2-я Фрунзенская ул., РЭВС № 1, К37004[3] (сухой)	720	1020	1740	То же	То же	7,7 7,7/69[5]
Люблино, Цимлянская ул., 14, РЭВС № 3, К87327[3] (сухой)	720	980	1700	-»-	То же	7,8 7,1/555
Пойма р. Москвы, Коломенская наб., РЭВС № 4, К74959[3] (сухой, с подтоплениием в весенние месяцы)	720[6]	940	1660	То же (при подтоплении — среднеагрессивная)	-"-	9,9 10,5/50[5]
Северный, 2-я Хуторская ул., 40, маршрут 60, РЭВС № 2, К13385[4] (мокрый)	8760	—	8760	Среднеагрессивная	—	6,2
Северный, Алтуфьевское ш., 33а, РЭВС № 2 К42617[4] (мокрый)	8760	—	8760	Среднеагрессивная	—	6,8
Люблино, Южно-портовая ул., 7а, РЭВС № 3, К60625[4] (мокрый)	8760	—	8760	Среднеагрессивная	—	7,6
Пойма р. Москвы, Коломенская ул., 5, РЭВС № 4, К74946[4] (мокрый)	8760	—	8760	Средне-агрессивная	—	7,5
Солнцево, Родниковая, Производственная ул., РЭВС № 5, К86714[4] (мокрый)	8760	—	8760	Среднеагрессивная	—	7,5

Примечания. [1] Вид атмосферы по ГОСТ 15150 — промышленный.

[2] Указана среднегодовая положительная температура, рассчитанная по методике ГОСТ 16350—80 «Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей».

[3] Зона колодца находится в сухом состоянии.

[4] Зона колодца находится в мокром состоянии.

[5] Температура и влажность, °С/%, в колодцах, определенная 22.03.2011 г.

[6] Весной один месяц подтопления колодца (30×24 = 710 ч фазовая пленка).

• жидкие примеси, попадающие на поверхность вместе с осадками.

Данные по основным характеристикам исследуемых колодцев РЭВС представлены в *табл. 1*.

Концентрации основных агрессивных веществ в атмосфере г. Москвы по данным [2, 3] составили: SO_2 — от 0,201 до 0,500 г/м^3, Cl^- — до 1 мг/(м^2 сут). Тип атмосферы по уровню загрязнения — промышленный.

Проведенные исследования характеристик колодцев РЭВС г. Москвы показал, что зоны колодцев находятся как в сухом, так и в мокром состоянии при нормальном влажностном режиме (54—69 %), с pH 6,2—7,8 и средней годовой температурой 7...10 °С. Вид атмосферы по ГОСТ 15150—69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды» определяется как промышленная со слабоагрессивной (при подтоплении в весенние месяцы — среднеагрессивной) степенью воздействия в сухих колодцах и среднеагрессивной степенью воздействия в мокрых колодцах.

Содержание веществ, ускоряющих коррозию в атмосфере (хлориды, оксиды серы), не нормируется нормативно-технической документацией. Однако в научных публикациях имеются сведения о зависимости коррозии стали, стали с цинковым и кадмиевым покрытиями, алюминия и других конструкционных материалов от концентрации агрессив-

ных веществ в атмосфере. В работах [10, 11] приведены расчетные и экспериментальные данные, позволяющие оценить коррозию ряда конструкционных материалов в различных условиях.

Концентрация агрессивных веществ по уровню загрязнений (ГОСТ 9.039) в промышленной атмосфере для SO_2 составляет 0,201–0,5 г/м^3, для Cl^- – 1 мг/(м^2 сут).

Опыт проведения подобных испытаний показывает, что для получения значимых результатов подобные испытания должны продолжаться не менее 7000 ч. Для работы использовали эти данные, так как проведение непосредственных измерений концентрации агрессивных веществ в исследуемых районах согласно ГОСТ 9.039 требует значительного времени и материальной базы непосредственно на месте измерения. Однако достоверность данных [10, 11] не вызывает сомнений.

Концентрация агрессивных примесей в г. Москве и исследуемых внутренних зонах колодцев РЭВС показана в *табл. 2*.

Зависимость глубины коррозии термодиффузного цинкового (ТДЦ) покрытия при ускоренных испытаниях в 3 %-ном растворе NaCl при периодическом погружении от продолжительности испытаний приведена на *рисунке*. Данные *табл. 1 и 2* использовали для построения модели развития коррозии.

2. Концентрация агрессивных примесей в Москве и исследуемых зонах колодцев РЭВС

Регион (район)	Концентрация SO_2, мг/м^3	Концентрация Cl^-, мг/(м^2 сут)
Москва	⩽ 0,5	1
РЭВС (зона колодцев)	Исследуемые параметры воды, г/л	
	сульфаты	хлориды
Центральный, 2-я Фрунзенская ул., РЭВС № 1, К37004	0,0496	0,406
Северный, 2-я Хуторская ул., 40, маршрут 60, РЭВС № 2, К13385	0,0657	1,39
Северный, Алтуфьевское ш., 33а, РЭВС № 2 К42617	0,352	0,733
Люблино, Южнопортовая ул., 7а, РЭВС № 3, К60625	0,0343	0,0211
Люблино, Цимлянская ул., 14, РЭВС № 3, К87327	0,0064	1,34
Солнцево, Родниковая, Производственная ул., РЭВС № 5, К86714	–	0,53
Пойма р. Москвы, Коломенская наб., РЭВС № 4, К74959	–	0,67

Прогнозирование срока службы крепежа в исследуемых районах (колодцах РЭВС). Обобщение результатов, полученных при проведении исследований крепежа, ускоренных испытаний, анализа литературных данных, позволили разработать достаточно простую математическую модель, описывающую коррозию крепежных изделий из углеродистой стали с ТДЦ покрытием. Данная модель является приложением более общей математической модели, разработанной в Институте физической химии АН Ю. Н. Михайловским [10, 11]. Использование модели позволяет сократить объем информации, которую необходимо собрать для разработки районирования зон колодцев РЭВС на территории Москвы по коррозионной активности. Данную модель возможно распространить на прогнозирование коррозионной стойкости и других элементов запорно-регулирующей арматуры и трубопроводов.

Математическую модель атмосферной коррозии следует рассматривать как сложную функцию температурно-влажностного и химического комплексов атмосферы. В условиях открытой атмосферы основными параметрами, определяющими скорость коррозии, являются:

- продолжительность увлажнения поверхности фазовыми и адсорбционными пленками (ГОСТ 9.039);
- температура воздуха (ГОСТ 16350);
- концентрация Cl^- и SO_2 [10, 11];
- сочетания контактирующих металлов.

Атмосферную коррозию можно рассматривать как совокупность процессов, в которых не все влияющие на процесс факторы могут быть учтены при количественном расчете. В общем случае при расчете необходимо учитывать действие многих разнородных факторов, контролирующих различные по своей природе, но тесно взаимосвязанные процессы.

Наиболее сложный и трудно формализуемый процесс – изменение скорости коррозии от времени, поскольку образующиеся на поверхности металлов продукты корроззии, как правило, существенно замедляют процесс.

Расчетным параметром служит величина уменьшения массы металла или покрытия при заданных условиях. Скорости корро-

зии определяются на основании уменьшения толщины покрытия в различных агрессивных средах.

Предварительный расчет и корректировку данных о коррозионной устойчивости цинковых покрытий в зонах колодцев (промышленная атмосфера) проводили по формуле [12]

$$M = \alpha(CSO_2)^n \Sigma t_ф K_т, \quad (1)$$

где M — коррозия металла, г/м^2·год; α — средняя скорость коррозии с учетом второго года эксплуатационных испытаний, $\alpha = 51 \cdot 10^{-3}$, г/м^2·ч; n — постоянный коэффициент, n =0,75; CSO_2 — концентрация SO_2, мг/м^3; $t_ф$ — продолжительность коррозии под фазовой пленкой влаги, ч/год; $\Sigma t_ф$ принимают по *табл. 3*; $K_т$ — коэффициент торможения коррозии, в мокром колодце $K_т$ = 0,15, в сухом — $K_т$ = 1;

РЭВС № 1, К37004^с: $M = 0{,}051 \times (0{,}455)^{0{,}75} \times 720 = 20{,}34/7{,}14$ (2,85 мкм/год);

РЭВС № 2, К13385^м: $M = 0{,}051 \times (1{,}365)^{0{,}75} \times 8760 \times 0{,}15 = 84{,}60/7{,}14$ (11,8 мкм/год);

РЭВС № 2, К42617^м: $M = 0{,}051 \times (1{,}058)^{0{,}75} \times 8760 \times 0{,}15 = 69{,}90/7{,}14$ (9,79 мкм/год);

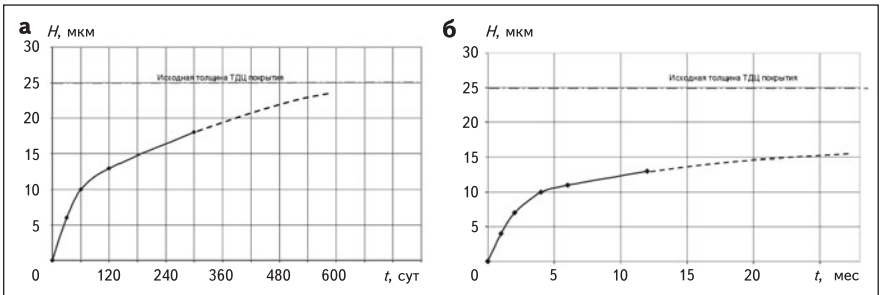
РЭВС № 3, К60625^м: $M = 0{,}051 \times (0{,}550)^{0{,}75} \times 8760 \times 0{,}15 = 42{,}80/7{,}14$ (5,9 мкм/год);

РЭВС № 3, К87327^с: $M = 0{,}051 \times (1{,}346)^{0{,}75} \times 720 = 45{,}90/7{,}14$ (6,43 мкм/год);

РЭВС № 4, К74959^с: $M = 0{,}051 \times (0{,}676)^{0{,}75} \times 1400 = 53{,}26/714$ (7,46 мкм/год);

РЭВС № 5, К86714^м: $M = 0{,}051 \times (0{,}530)^{0{,}75} \times 8760 \times 0{,}15 = 41{,}61/7{,}14$ (5,83 мкм /год).

Предварительный расчет коррозионной устойчивости цинковых покрытий по формуле (1) и экспериментальные данные по коррозии термодиффузионных цинковых покрытий на крепеже за первый год эксплуатационных испытаний в разных зонах колодцев РЭВС практически одного порядка. Ошибка расчетов составляет примерно от 10 до 15 % при магнитном и от 5 до 10 % при металлографическом методах определения остаточной толщины цинкового покрытия.



30 сут увлажнения соответствуют ~ 3,3 года натурных испытаний (а);
1 мес ускоренных испытаний соответствует ~ 1,3 года натурных испытаний (б)

Зависимость глубины коррозии ТДЦ покрытия H при ускоренных испытаниях в 3 %-ном растворе NaCl (а) и в растворе H_2SO_4 с pH 5 (б) от продолжительности испытаний t

Экспериментальные значения скорости коррозии могут быть также представлены в виде степенных функций, полученных путем обработки результатов эксперимента, проведенного Ю. Н. Михайловским [12], в виде функции времени.

При построении модели были сделаны допущения:

- вид функции, описывающей изменение тока коррозии во времени, остается в реальных условиях таким же, как и при ускоренных испытаниях;.
- температурно-влажностные режимы атмосферы колодцев, концентрация агрессивных веществ в них остаются неизменными на весь период прогнозирования;
- влияние механических воздействий (нагружение, вибрация) не учитывается;
- скорость коррозии под фазовыми и адсорбционными пленками принимается одинаковой.

В работе [10] приведены значения скоростей коррозии цинка под фазовыми и адсорбционными пленками. Скорость коррозии под адсорбционными пленками в 1,1—1,2 раза ниже скорости коррозии под фазовыми пленками. Ускоренные испытания проводятся в условиях увлажнения поверхности фазовыми пленками. Кроме того, время пребывания под фазовыми пленками существенно больше времени пребывания под адсорбционными пленками *(см. табл. 1)*. Таким образом, ошибка вычислений, обусловленная этим допущением, составит не более 10 %, при этом допущения значительно упрощают модель коррозии.

Зависимость потерь массы при атмосферной коррозии может быть представлена в виде суммы процессов потери массы в условно чистой атмосфере, от коррозии в растворе соединений хлора и от коррозии в растворе, содержащем соединения серы, а также учитывающей влияние температуры функции.

Функция, описывающая потери массы при атмосферной коррозии от времени с единицы площади, г/м^2·год (мкм/год), имеет вид

$$M(t) = \{V_0(t) + V_c(t)[C_{c1}/(C_c)] + V_s(t)[C_{s1}/(C_s)] + aT\}t, \quad (2)$$

где $V_0(t)$ — скорость коррозии металла в водопроводной воде; $V_c(t)$ — скорость коррозии металла при испытаниях в 3 %-ном растворе NaCl; C_{c1} — концентрация хлоридов в рассматриваемом районе (зоне); C_c — концентрация хлоридов при ускоренных испытаниях, при которой была определена функция $V_c(t)$, отнесенная ко времени эксплуатации объекта; $V_s(t)$ — скорость коррозии металла в растворе Na_2SO_4, подкисленном до pH 5; C_{s1} — концентрация сульфатов в рассматриваемой зоне; C_s — концентрация сульфатов при ускоренных испытаниях, при которых была определена функция $V_s(t)$, отнесенная ко времени эксплуатации объекта; a — постоянный коэффициент; T — средняя температура за год, вычисленная по

3. Результаты расчета по формуле (2)

Параметр	Определяемые зоны коррозии				
	РЭВС № 1 К37004^{С}	РЭВС № 2 К13385^{М} К42617^{М}	РЭВС № 3 К87327^{С} К60625^{М}	РЭВС № 4 К74959^{С}	РЭВС № 5 К86714^{М}
$M(t)$, г/м^2·год (мкм/год)	28 (4,1)	46,6 (6,5) 67,8 (9,4)	37,6 (5,2) 54,1 (7,5)	36,5 (5,1)	50,8 (7,1)
$V_0(t)$, г/(м^2·ч)	0,0015	0,0015	0,0015	0.0015	0,0015
$V_c(t)$, г/(м^2·ч)	0,0034	0,0034	0,0034	0,0034	0,0034
C_{c1}, г/л	0,406	13,9 7,33	13,4 0.22	6,7	5.3
C_c, г/л	27	27	27	27	27
$V_s(t)$, г/(м^2·ч)	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
C_{s1}, г/л	0,0496	0,0657 0,352	0,0639 0.0343	–	–
C_s, г/л	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
a	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
T, °С	7,7	6,2 6,8	7,8 7,6	9,9	7,5
t, ч	720	1314	720 1314	1314	720

среднемесячным температурам для интервала от –1 °С до максимальной наблюдаемой (ГОСТ 9.040); t – время эксплуатации, ч, $t = nt_1$, n – число лет эксплуатации; t_1 – продолжительность нахождения под фазовыми и адсорбционной пленками влаги в течение года (ГОСТ 9.030).

Расчеты по формуле (2) выполнены для случаев, которые рассмотрены в *табл. 1, 2* и на *рисунке,* и приведены в *табл. 3.*

Расчетная скорость коррозии для конкретного района (зоны колодца) рассчитывают по зависимости

$$A(t) = d(M(t))/dt. \quad (3)$$

Момент времени, при котором прогнозируется полное исчезновение цинка с поверхности крепежа, определяется точкой пересечения горизонтальной линии, определяющей значение исходной толщины покрытия и кривой функции $\delta(t)$ для цинкового покрытия *(см. рисунок).* Исходная толщина термодиффузионного цинкового покрытия болтов из углеродистой стали показана горизонтальной линией. Согласно расчетам срок службы покрытия в агрессивной атмосфере составляет более 20 лет.

Определение срока службы крепежных изделий в колодцах РЭВС. Максимальный срок службы оцинкованного крепежа, подверженного воздействию только коррозии, можно представить как

$$T_{\max} = \delta_0(m_{Zn}/7{,}2)/V_{Zn} + \quad (4)$$

$$+ \delta_1/V_{Zn}K_{эZn} +$$

$$+ (h + d_0 0{,}01)/V_{Fe}K_{эс},$$

где m_{Zn} – исходная плотность цинкового покрытия, г/м^2; δ_0 – исходная толщина цинкового покрытия, мкм; δ_1 – толщина цинкового покрытия после первого года эксплуатации, мкм; $K_{эZn}$, $K_{эс}$ – коэффициенты снижения скорости коррозии соответственно цинка и стали [13]; V_{Zn} – средняя скорость коррозии цинка, определенная при ускоренных испытаниях в 3 %-ном растворе NaCl продолжительностью 300 сут, мкм/год; h – толщина поверхностного слоя (α-фаза) металла крепежа, мкм; d_0 – исходный диаметр крепежа, мм; V_{Fe} – скорость коррозии стали, мкм/год.

Формула (4) получена исходя из допущения, что для прекращения функционирования крепежа (М16) в результате коррозии необходимо полное исчезновение термодиффузионного цинкового покрытия, поверхностного слоя на 1/3 толщины покрытия и уменьшения диаметра крепежа на 0,1 %.

Величина $T_{\max}$ является максимально возможным временем эксплуатации крепежного изделия (болта):

РЭВС № 1, К37004^{с}: $T_{\max}$ = 25/4,1 + 20,9/1,2 + (8,3 + 16000 × 0,01)/70 × 0,3 = 31 год;

РЭВС № 2, К42617^{м}: $T_{\max}$ = 25/9,1 + 15,9/1,2 + (8,3 + 16000 × 0,01)/70 × 0,3 = 24 года.

Выводы

1. Разработана методика прогнозирования срока службы новых типов крепежных изделий (крепеж из углеродистой стали с термодиффузионным цинковым покрытием) в зависимости от мест установки и условий эксплуатации.

2. Определены температура, влажностный режим и степень агрессивной активности в колодцах РЭВС, которые представлены в *табл. 1.*

3. Проведен предварительный расчет коррозионной устойчивости цинковых покрытий в зонах колодцев РЭВС, где показано, что ошибка расчетов по методике и данных, полученных после эксплуатационных и ускоренных коррозионных испытаний, составляет примерно от 10 до 15 % при магнитном и от 5 до 10 % при металлографическом методах определения остаточной толщины цинкового покрытия.

4. Средний срок службы крепежных изделий с термодиффузионным цинковым покрытием в колодцах РЭВС (по предварительным расчетам) составляет не менее 20 лет.

5. Для разработки рекомендаций по применению различных типов крепежных изделий в зависимости от мест установки и условий эксплуатации в колодцах РЭВС необходимо определить:

• скорость коррозии крепежных изделий с ТДЦ покрытием после двух лет эксплуатационных испытаний, а также скорость торможения вследствие дополнительной обработки выступающих частей крепежа специальными смазками после монтажа;

• влияние контактной коррозии (запорно-регулирующая арматура из ВЧШГ, фланцы из углеродистой стали, болты и шпильки из углеродистой стали с ТДЦ покрытием и из коррозионно-стойкой стали) на коррозионную стойкость крепежа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Козлов М. Н., Меньщикова О. А., Доможаков Д. А.* [и др.]. Сравнительные испытания коррозионностойких крепежных изделий для водопроводной сети. М. : Экватэк, 2010.
2. *Сотсков Н. И.* Термодиффузионное цинкование – эффективный метод антикоррозионной защиты высокопрочного крепежа. Методы контроля // Черная металлургия. 2019. Т. 75. № 9. С. 1066–1076.
3. *Кабанов Е. Б., Лебедев О. С.* Выбор оптимальной толщины диффузионного цинкового покрытия для крепежных изделий // Метизы. 2003. № 2(03). С. 51–53.
4. *Жуков. Б. М., Сотсков Н. И.* Исследование коррозии грозозащитных тросов ВЛ и прогнозирование их сроков службы // Материалы семинара «Современное состояние вопросов эксплуатации, проектирования и строительства ВЛ (МЭС-4)». М. : Энергия, 2009. С. 535–541.
5. *Перелыгин Ю. П., Лось И. С., Киреев С. Ю.* Коррозия и защита металлов от коррозии. Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. 88 с.
6. *Каблов Е. Н., Старцев О. В., Медведев И. Л.* Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 2. С. 76–87.
7. Водный сектор в Германии. Методы и опыт / Институт экологической техники и управления Университета Виттен-Хердеке ГмбХ, 2001. 151 с.
8. *Швыдкая А. В.* Изучение коррозии металлов // Старт в науке. 2020. № 1. С. 26.
9. *Михайловский Ю. Н.* Коррозия металлов. М. : Металлургия, 1976. 325 с.
10. *Михайловский Ю. Н., Кларк Г. Б., Шувахина Л. А.* [и др.]. Расчет скорости атмосферной коррозии цинковых и кадмиевых покрытий в различных климатических зонах по метеорологическим параметрам // Защита металлов. 1971. Т. 7. № 5. С. 534–539.
11. *Томашов Н. Д.* Коррозия и защита металлов. М. : Черная и цветная металлургия, 1962. 320 с.
12. *Михайловский Ю. Н.* Атмосферная коррозия металлов и методы защиты. М. : Металлургия, 1989. 103 с.
13. *Анастасиев П. И., Коляда А. В., Проэктор Е. Г.* Защита линий электропередачи от коррозии и загрязненности атмосферы. М. : Энергоатомиздат, 1983. 168 с.

REFERENCES

1. Kozlov M. N., Men'shchikova O. A., Domozhakov D. A. et al. *Sravnitel'nye ispytaniya korrozionnostoykikh krepezhnykh izdeliy dlya vodoprovodnoy seti* [Comparative tests of corrosion-resistant fasteners for the water main]. Moscow, Ekvatek Publ., 2010. (In Russian).
2. Sotskov N. I. Thermodiffusion galvanizing is an effective method of anticorrosive protection of high – strength fasteners. Control method. *Chernaya metallurgiya*, 2019, vol. 75, no. 9, pp. 1066–1076. (In Russian).
3. Kabanov E. B., Lebedev O. S. Choosing the optimal thickness of the diffusion zinc coating for fasteners. *Metizy*, 2003, no. 2(03), pp. 51–53. (In Russian).
4. Zhukov. B. M., Sotskov N. I. Investigation of lightning protection cables corrosion and prediction of their service life. *Materialy seminara "Sovremennoe sostoyanie voprosov ekspluatatsii, proektirovaniya i stroitel'stva VL (MES-4)"* [Current state of operation, design and construction of overhead lines (MES-4)]. Moscow, Energiya Publ., 2009, pp. 535–541. (In Russian).
5. Perelygin Yu. P., Los' I. S., Kireev S. Yu. *Korroziya i zashchita metallov ot korrozii* [Corrosion and protection of metals from corrosion]. Penza, PGU Publ., 2015. 88 p. (In Russian).
6. Kablov E. N., Startsev O. V., Medvedev I. L. Review of foreign experience in corrosion research and corrosion protection products. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 2, pp. 76–87. (In Russian).
7. *Vodnyy sektor v Germanii. Metody i opyt* [Water sector in Germany. Methods and experience]. Universität Witten/Herdecke, 2001. 151 p. (In Russian).
8. Shvydkaya A. V. Study of metal corrosion. *Start v nauke*, 2020, no. 1, p. 26. (In Russian).
9. Mikhaylovskiy Yu. N. *Korroziya metallov* [Corrosion of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976. 325 p. (In Russian).
10. Mikhaylovskiy Yu. N., Klark G. B., Shuvakhina L. A. et al. Calculation of the rate of atmospheric corrosion of zinc and cadmium coatings in various climatic zones by meteorological parameters. *Zashchita metallov*, 1971, vol. 7, no. 5, pp. 534–539. (In Russian).

11. Tomashov N. D. *Korroziya i zashchita metallov* [Corrosion and protection of metals]. Moscow, Chernaya i tsvetnaya metallurgiya Publ., 1962. 320 p. (In Russian).
12. Mikhaylovskiy Yu. N. *Atmosfernaya korroziya metallov i metody zashchity* [Atmospheric corrosion of metals and methods of protection]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989. 103 p. (In Russian).
13. Anastasiev P. I., Kolyada A. V., Proektor E. G. *Zashchita liniy elektroperedachi ot korrozii i zagryaznennosti atmosfery* [Protection of power lines from corrosion and atmospheric pollution]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 168 p. (In Russian).

Для цитирования: *Сотсков Н. И., Меньщикова О. А.* Прогнозирование срока службы оцинкованных крепежных изделий в водопроводных колодцах // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 10. С. 31—38. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.10.31-38.

For citation: Sotskov N. I., Menshikova O. A. Forecasting the Service Life of Galvanized Fasteners in Water Supply Pits. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2020, no. 10, pp. 31—38. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2020.10.31-38.