



УДК 624.014:620.193

ТРЕБОВАНИЯ КАЧЕСТВА, НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИЩЕННОСТЬЮ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ

В.П. Королёв

QUALITY, RELIABILITY AND SAFETY REQUIREMENTS FOR MANAGEMENT OF CORROSION PROTECTION OF STRUCTURAL STEEL AND INSTALLATIONS

V.P. Korolov

Аннотация. Выполнен анализ современных нормативных положений, устанавливающих требования к обеспечению качества противокоррозионной защиты металлоконструкций. Рассмотрены условия расчетной оценки и подтверждения соответствия надежности металлических конструкций и их защитных покрытий на основе метода предельных состояний. Обоснован методический подход к управлению рисками коррозионной защищенности с учетом параметров конструктивной и технологической безопасности зданий и сооружений. Основным результатом теоретических и экспериментальных исследований является разработка сбалансированных индексов коррозионной защищенности, позволяющих обеспечивать стратегическое управление показателями качества, надежности и безопасности конструкций и сооружений на принципах «бережливого хозяйствования» концепции *Lean Six Sigma*.

Ключевые слова: *коррозионная защищенность; металлические конструкции; технико-экономические риски; стратегическое управление; качество; надежность; безопасность.*

Abstract. Up-to-date regulations setting the requirements to ensure the quality of corrosion protection of structural steel have been analyzed. Considered are conditions of the estimated assessment and confirmation of compliance of reliability of metal structures and their protective coatings based on the limit state method. Methodical approach has been justified to managing risks of corrosion protection with account for parameters of structural and process safety of buildings and installations. The main result of theoretical and experimental studies is the development of the balanced indices of corrosion protection which allow ensuring the strategic management of indices of quality, reliability and safety of structures and installations on the principles of “lean production” of the *Lean Six Sigma* concept.

Key words: *corrosion protection; structural steel; technical and economic risks; strategic management; quality; reliability; safety.*

Введение

На всех этапах развития и совершенствования металлических конструкций значительное внимание уделяется дополнительным мерам, направленным на повышение коррозионной стойкости и защиты от коррозии строительных объектов [1]. Обоснование выбора средств и методов противокоррозионной защиты имеет первостепенное значение для большепролетных и высотных сооружений с учетом особых условий ремонтпригодности конструкций.

Как известно, основные требования EN 1990 по обеспечению качества и надежности конструкций предусматривают выполнение расчета по методу предельных состояний с использованием частных коэффициентов безопасности, приведенных в EN 1990, и сочетаний нагрузок EN 1991. Обеспечение несущей способности, эксплуатационной пригодности и долговечности осуществляется по правилам, установленным в EN 1993. Таким образом,

управление надежностью и безопасностью достигается путем задания проектных требований и соответствующих методов производства работ, контроля качества при изготовлении, возведении и эксплуатации конструкций и сооружений.

В отличие от имеющихся возможностей применения расчетных моделей и ситуаций согласно EN 1990, EN 1991 по нормам EN 1993 обеспечение коррозионной стойкости предполагает использование характеристик систем защитных покрытий (EN ISO 12944, EN 1461) и нержавеющей стали (EN 1993-1-4). При этом ограничиваются возможности анализа эксплуатационных и аварийных воздействий методами расчетной оценки долговечности при восстановлении работоспособного состояния конструкций. Негативные воздействия в условиях старения материалов, коррозии или усталости учитываются путем конструктивного запаса или надлежащего выбора материалов соответствующей системы защиты от коррозии (EN 1993-1-4 и EN 1993-1-10). Отсутствие сбалансированных индексов оценивания эффективности повышения коррозионной стойкости (первичной защиты) и долговечности покрытий (вторичной защиты) сдерживает инновационное развитие материалов и технологий противокоррозионной защиты.

На основе вышеизложенного можно заключить, что реализация принципов управления надежностью сооружений, сформулированных в EN 1990, EN 1991, затрудняется в условиях неопределенности показателей коррозионного состояния конструкций. Поэтому, несомненную актуальность представляет развитие стратегического управления коррозионной защищенностью на основе пяти принципов стратегии DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control).

Цель и задачи исследования. Целью статьи является формирование единого методического подхода к обеспечению качества, надежности и безопасности строительных объектов с учетом риск-анализа сбалансированных индикаторов управления инновационным развитием циклов коррозионной защищенности конструкций и сооружений на основе ресурсосберегающих материалов и технологий.

Формирование механизма нормативно-технического и экономического регулирования эффективности мер по защите от коррозии, в условиях ограниченных финансовых и материальных ресурсов, связано с заданием уровня коррозионной опасности конструкций и сооружений [2, 3]. Указанные обстоятельства имеют определяющее значение для обоснования комплексных критериев качества, надежности и безопасности систем противокоррозионной защиты конструкций (СПЗК).

Оценка рисков СПЗК

Процесс оценки риска выдвигает на первый план определение угроз, а также возможностей повышения коррозионной защищенности. Область применения методов оценки риска включает контроль определительных параметров коррозионного состояния (ОПКС), которые могут изменяться в течение продолжительного времени. Условия управления рисками обеспечивают последовательный переход или корректировку расчетных ситуаций при разработке программ обеспечения надежности (ПОН). Поэтому, угрозы прогрессирующего развития ОПКС и возможности регламента ПОН должны быть однозначно идентифицированы на основе мониторинга признаков коррозионной опасности.

Понятие коррозионной опасности включает определенное состояние или ситуацию (угрозу), при которых увеличивается вероятность наступления ущерба в связи с тем, что данное коррозионное состояние или отклонение от нормальной эксплуатации являются потенциальной причиной (угрозой) наступления опасности или того, что может повлиять на размер ущерба [4, 5]. Создание системы стратегического управления коррозионной защищенностью направлено на оценивание рисков с использованием адаптационных и превентивных инструментов повышения эффективности работы служб технического надзора предприятий (рис. 1).



Рисунок 1 – Иерархия элементов стратегического управления коррозионной защищенностью конструкций и сооружений

Оценку рисков предлагается выполнять в соответствии с требованиями ISO/IEC 31010 на основе метода HAZOP (Hazard and Operability Study), направленного на выявление угроз и возможностей запланированных мер поддержания работоспособного состояния СПЗК. Критерии для идентификации технико-технологических рисков по признакам коррозионной опасности и коррозионной защищенности представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Классификация признаков технико-технологических рисков коррозионной защищенности

Состояние СПЗК	Класс опасности	Наименование риска	Характеристика потерь	Уровень технологической безопасности (R_i , балл)	Размер потенциального ущерба, МРОТ*
Коррозионная опасность	1	Катастрофический	Частичное или полное разрушение конструкций и сооружений	9–10	> 72500
	2	Критичный	Потери превышают расчетные суммы валового дохода восстановления объектов	7–8	25000–72500
Коррозионная защищенность	3	Допустимый	Потери не превышают расчетные суммы прибыли при продлении ресурса и технологическом обновлении объектов	5–6	2500 – 25000
	4	Приемлемый	Потери не превышают затрат на поддержание качества в период срока эксплуатации объекта	1–4	< 2500

*МРОТ – минимальный размер оплаты труда

По определению риск является функцией вероятности реализации угрозы, а также величины возможного ущерба. Принципиальной особенностью оценки рисков является взаимосвязь показателей качественных и количественных показателей [6, 7]. Вместе с этим, для структурирования входных данных при оценке рисков, необходим интегральный показатель, который определяет базисную основу анализа и принятия решений. Комплексный критерий уровня риска коррозионной защищенности (УРКЗ) имеет вид:

$$\text{УРКЗ} = \text{ЗСЗК} / \text{КСКП}, \quad (1)$$

где **ЗСЗК** – затраты на систему защиты от коррозии; **КСКП** – компенсационная составляющая коррозионных потерь.

Индикаторы КСКП и ЗСЗК (в денежных единицах) рассчитывают на единую натуральную единицу измерения, характеризующую сравниваемые конструкции (шт., т, м³, м², м). Индекс УРКЗ изменяется от нуля до единицы, выше которой риск не оправдан. Анализ УРКЗ позволяет производить нормирование его интервальных значений по группам объектов.

Предлагается рассматривать управление коррозионной защищенностью на основе риск-анализа в соответствии с размером нормы доходности инноваций:

$$\text{НД} = (\text{КСКВ} - \text{ВСЗК}) / \text{ВСЗК} = \text{ЭЭСЗ} / \text{ЗСЗК}, \quad (2)$$

где **ЭЭСЗ** – экономическая эффективность средств защиты.

Индикаторный подход связан в первую очередь с необходимостью эффективного использования материалов и технологий. Сущность организационно-экономического механизма управления качеством, надежностью и безопасностью конструкций и их защитных покрытий определяется обоснованием требуемых ЗСЗК на основе оценки КСКП и УРКЗ. Приняв УРКЗ за основу, мы получаем возможность анализа коррозионной защищенности по классификационным категориям надежности конструкций.

Нормирование требований к качеству и надежности СПЗК

Совершенствование норм проектирования, включая разработку основ, принципов и методов задания надежности, связано с решением проблем конструктивной и технологической безопасности. Чтобы реализовать стратегию экономического регулирования коррозионной защищенности, необходимо обеспечить условия мониторинга ОПКС конструкций и сооружений.

С 1 января 2014 года вступил в силу ДСТУ Б В.2.6-193:2013 «Защита металлических конструкций от коррозии. Требования к проектированию». Важным условием проектного оценивания рисков является задание уровня коррозионной защищенности (ZI – ZIV) или коррозионной опасности (KI – KV) с учетом регламентных процедур подтверждения соответствия конструктивной приспособленности и технологической рациональности СПЗК. Данным стандартом предоставлены возможности выбора приемлемой СПЗК при согласованной собственником системы технического обслуживания и ремонта. Вместе с этим, созданы условия для пересмотра требований Пособия [8] для мотивации принятия решений о восстановлении работоспособного состояния конструкций по признакам коррозионной опасности, установленным в табл.2.

Коэффициент готовности стальных конструкций (K_g) является комплексным показателем ремонтпригодности, характеризующим параметры конструктивных и технологических мер первичной и вторичной защиты:

$$K_g = \frac{T_{k\gamma} + T_{z\gamma}}{T_{k\gamma} + nT_{z\gamma}}; \quad (3)$$

где T_{ky} - срок службы (год) стальных конструкций по показателю коррозионной стойкости (первичная защита); $T_{z\gamma}$ - расчетный срок службы (год) покрытий с доверительной вероятностью $\gamma=0,95$ по результатам определительных испытаний; n - количество ремонтных циклов возобновления противокоррозионной защиты при установленном сроке службы объекта.

Таблица 2 – Обобщенная матрица выбора уровня показателей надежности СПЗК

Степень агрессивности воздействий, K , мм/год	Интервальные оценки коэффициента готовности противокоррозионной защиты, K_g				
	$0 < K_g \leq 0,1$	$0,1 < K_g \leq 0,3$	$0,3 < K_g \leq 0,5$	$0,5 < K_g \leq 0,7$	$0,7 < K_g \leq 1,0$
Слабоагрессивная, $0,01 < K \leq 0,05$	KI	ZIV	ZIII	ZII	ZI
Низкоагрессивная, $0,05 < K \leq 0,15$	KII	KI	ZIV	ZIII	ZII
Высокоагрессивная, $0,15 < K \leq 0,30$	KIII	KII	KI	ZIV	ZIII
Очень высокоагрессивная, $0,30 < K \leq 0,50$	KIV	KIII	KII	KI	ZIV
Сильноагрессивная, $K > 0,50$	KV	KIV	KIII	KII	KI

Классификационные признаки циклов коррозионной защищенности представлены в виде матрицы на рис. 2.

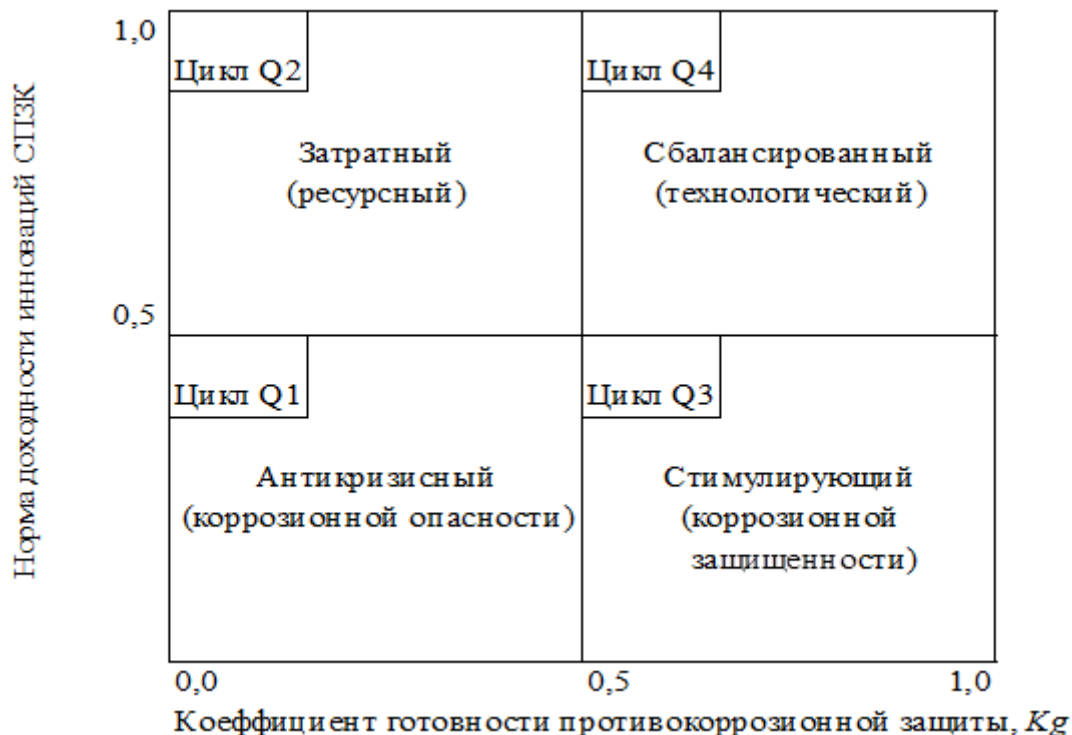


Рисунок 2 – Матрица циклов коррозионной защищенности конструкций и сооружений

Основными входными данными при идентификации угроз по методу HAZOP являются ОПКС, а также цели и функциональные требования для обеспечения

технологической безопасности СПЗК. В таких условиях мониторинг ОПКС включает систему контроля характера и интенсивности коррозионных повреждений, выявления изменений работоспособного состояния с целью принятия при необходимости мер по устранению негативных последствий.

Обзор структуры частных коэффициентов надежности по данным EN 1990, EN 1991 (табл. 3) позволяет предложить критерии для раскрытия неопределенности допустимого снижения показателей качества и надежности для установленных категорий ответственности конструкций по коррозионной защищенности (табл. 4).

Таблица 3 – Частные коэффициенты оценки предельных состояний по коррозионной защищенности

Основные переменные	Частные коэффициенты				
	Условия EN 1990		Условия национальных стандартов		
	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	Нормы
Воздействия	Коэффициент надежности по воздействиям	γ_f	Коэффициент надежности по агрессивным воздействиям	γ_{fk}	ДСТУ Б В.2.6-193
Материалы, покрытия	Коэффициент надежности свойств материала	γ_m	Коэффициент надежности по коррозионной стойкости материала	γ_{mk}	ДСТУ Б В.2.6-XX0
			Коэффициенты надежности первичной защиты	γ_{zk}	
			Коэффициенты надежности вторичной защиты	γ_{zn}	
Эффекты воздействий	Коэффициент учета эффекта воздействий	γ_{sd}	Коэффициент коррозионных потерь	γ_{ef}	ДСТУ Б В.2.6-XXI

Таблица 4 – Категории ответственности защитных покрытий по коррозионной стойкости конструкций и их защитных покрытий

Обозначение категории ответственности	Условие соответствия категории ответственности	Интервальная оценка отказа защитных свойств покрытий по критерию:		Коэффициент надежности γ_{zn}
		A_z	h_k , мкм	
П1	Допускает снижение декоративных свойств вторичной защиты	0,85 - 0,90	-	0,99 - 1,00
П2	Не допускает снижения защитных свойств вторичной защиты	0,55 - 0,60	-	0,95 - 0,99
П3	Допускает снижение защитных свойств вторичной защиты	0,40 - 0,45	40 - 50	0,90 - 0,95
П4	Допускает снижение характеристик первичной защиты	0,30 - 0,35	90 - 100	0,85 - 0,90

Статистическое оценивание возможных отклонений характеристик материалов и воздействий в неблагоприятную сторону от их нормативных значений A_n , позволяет обосновать коэффициенты надежности по воздействиям γ_{fk} и материалу γ_{mk} . Коэффициент надежности по воздействиям γ_{fk} , зависит от степени агрессивности и категории размещения конструкций (ДСТУ Б В.2.6-193, табл. 2).

Коэффициенты надежности противокоррозионной защиты (γ_{zk} , γ_{zn}) учитывают допустимые отклонения эксплуатационных характеристик коррозионной защищенности конструктивных элементов в зависимости от категории ответственности СПЗК. Требования к показателям долговечности первичной и вторичной защиты устанавливаются с учетом заданного срока службы T_{ny} стальных конструкций и степени агрессивности воздействий среды A_n . Условие соответствия категории ответственности защитных покрытий определяются интервальными значениями обобщенного показателя защитных свойств (A_z) или критической толщины подпленочной коррозии (h_k , мкм).

Мониторинг и диагностика коррозионного состояния СПЗК. Определение рисков технологической безопасности при эксплуатации конструкций и сооружений по фактическому состоянию включает мониторинг ОПКС в зависимости от уровня СПЗК, уровня угроз и уязвимости корродирующих конструкций (табл. 5).

Таблица 5 – Риски технологической безопасности (R_i , балл) в зависимости от уровня СПЗК, уровня угроз и уязвимости конструкций зданий и сооружений

Уровень СПЗК	Уровень угрозы (категория технического состояния)														
	Низкий (I)			Ограниченный (II)			Средний (III)			Высокий (IV)			Предельный (V)		
	Оценка уязвимости (категория ответственности)														
	В	Б	А	В	Б	А	В	Б	А	В	Б	А	В	Б	А
ZI	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	6	7
ZII	1	2	2	2	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7
ZIII	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	6	6	7	7	7
ZIV	2	2	3	3	4	4	4	5	5	6	6	7	7	7	8
KI	2	3	3	4	4	4	5	5	6	6	7	7	7	8	8
KII	3	3	4	4	4	5	5	6	6	7	7	7	8	8	9
KIII	3	4	4	4	5	5	6	6	7	7	7	8	8	9	9
KIV	4	4	4	5	5	6	6	7	7	7	8	8	9	9	10
KV	4	4	5	5	6	6	7	7	7	8	8	9	9	10	10

В соответствии с разработанной методикой функции мониторинга предусматривают оценку признаков коррозионной опасности ($R_i = 2-6$ баллов):

- обнаружение и определение однородных по локализации коррозионных поражений и повреждений конструктивных элементов;
- контроль допусковых значений определяющих параметров коррозионной опасности объекта;
- оценка коррозионного состояния и выявление предельных состояний (отказов) конструкций и их защитных покрытий.

При выявлении критических рисков ($R_i = 7-8$ баллов) назначается экспертное диагностирование ОПКС, которое включает:

- расчет остаточного ресурса объекта;

- корректировку регламентных требований эксплуатации, анализ структурной схемы и разработку ПОН для восстановления работоспособного состояния конструкций.

Выводы

Управление рисками коррозионной защищенности позволяет устранить неопределенность и субъективизм при выборе проектных решений и восстановлении работоспособного состояния СПЗК. Для реального бизнеса оценка технологической безопасности строительных объектов означает снижение рисков, вызванных коррозионной опасностью, на принципах «бережливого хозяйствования» концепции *Lean Six Sigma*. Данный подход обеспечивает стратегическое управление развитием циклов коррозионной защищенности, ресурсосбережение с учетом инновационных материалов и технологий противокоррозионной защиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cost of Corrosion. Available at: <https://www.rustbullet.com/.../cost-of-corrosion> [Electronic resource]. (viewed on February 28, 2016).
2. Курс стальных конструкций: теория и практика / Под общ ред. Королёва В.П. Киев-Мариуполь: Изд-во «Сталь», 2016. 575 с.
3. Техническая диагностика и предупреждение аварийных ситуаций конструкций зданий и сооружений / Шимановский А. В., Гордеев В.Н., Королёв В.П. и др. Киев: Изд-во «Сталь», 2008. 462 с.
4. Korolov V., Filatov Yu., Magunova N., Korolov P. Management of the Quality of Corrosion Protection of Structural Steel Based on Corrosion Risk Level. *Journal of Materials Science and Engineering A & B*. 2013. V.3, No. 11, pp. 740–747.
5. Королёв В.П., Кущенко И.В. Нормативное регулирование надежности и безопасности систем противокоррозионной защиты металлоконструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 1. С. 37–42.
6. Королёв П.В. Экономический механизм риск-анализа коррозионной опасности промышленных объектов // Сб. публикаций научн. журнала «Globus». С-П.: Научный журнал «Globus», 2016, с. 69-73.
7. Korolov V., Godun T., Korolov P., Trofimchuk T. Structural Survivability Reserve Planning Based on Analysis of Corrosion Hazard of Industrial Facilities. *European Corrosion Congress, 20th International Corrosion Congress & Process Safety Congress (3-7 September 2017, Prague, Czech Republic) Book of Abstracts*, p. 639.
8. Пособие по контролю состояния строительных металлических конструкций зданий и сооружений в агрессивных средах, проведению обследований и проектированию восстановления защиты конструкций от коррозии (к СНиП 2.03.11-85) / Сост.: Голубев А.И., Горохов Е.В., Королёв В.П. и др. М.: Стройиздат, 1989. 51 с.

REFERENCES

1. Cost of Corrosion. Available at: <https://www.rustbullet.com/.../cost-of-corrosion> [Electronic resource]. (viewed on February 28, 2016).
2. *Kurs stalnykh konstruktsiy: teoriya i praktika / pod red. Korolova V.P.* [Course of structural steel: theory and practice]. Kyiv-Mariupol: Stal Publ., 2016. 575 p.
3. Shimanovsky A.V., Gordyeyev V.N., Korolov V.P. and others. *Tekhnicheskaya diagnostika i pryedupryezhdyeniye avariynykh situatsiy konstruktsiy zdaniy I sooruzhyenyi* [Technical diagnostics and prevention of emergency conditions of buildings and installations]. Kyiv: Stal Publ., 2008. 462 p.



4. Korolov V., Filatov Yu., Magunova N., Korolov P. Management of the Quality of Corrosion Protection of Structural Steel Based on Corrosion Risk Level. Journal of Materials Science and Engineering A & B. 2013. V.3, No. 11, pp. 740–747.

5. Korolov V.P., Kushchenko I.V. *Normativnoye regulirovaniye nadyezhnosti i byezopasnosti sistyem protivokorroziionnoy zashchity metallokonstruktsiy* [Statutory regulations for reliability and safety of structural steel corrosion protection system]. *Promyshlennoye I grazhdanskoye stroitelstvo*. 2016. No 1, pp. 740-747.

6. Korolov P.V. *Ekonomichyieskiy mekhanizm pbsk-analiza korroziionnoy opasnosti promyshlyennykh obyektov* [Economic mechanism of risk-analysis of corrosion hazard of industrial facilities]. *Globus*, 2016, pp. 69-73.

7. Korolov V., Godun T., Korolov P., Trofimchuk T. Structural Survivability Reserve Planning Based on Analysis of Corrosion Hazard of Industrial Facilities. European Corrosion Congress, 20th International Corrosion Congress & Process Safety Congress (3-7 September 2017, Prague, Czech Republic) Book of Abstracts, p. 639.

8. Golubyev A.I., Gorokhov Ye.V., Korolov V.P. and others. *Posibiye po kontrolyu sostoyaniya stroitelnykh metallichyeskikh konstruktsiy zdaniy I sooruzheniy v agryessivnykh sryedakh, provyedyenyu obslyedovaniy I proyektirovaniyu vosstanovleniya zashchity konstruktsiy ot korrozii* [Manual on monitoring of state of structural steel of buildings and installations in corrosive environments, surveying and design of renewal of structure corrosion protection]. (k SNiP 2.03.11-85). Moscow: Stroyizdat Publ., 1989. 51 c.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Королёв Владимир Петрович

Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, Украина, доктор технических наук, профессор, председатель подкомитета ПК-4 «Противокоррозионная защита в металлостроительстве» технического комитета ТК-301 «Металлостроительство»,

E-mail: center_sts@ukr.net

Korolov Vladimir Petrovich

Priazovskiy State Technical University, Mariupol, Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chairman of Sub-committee PK-4 «Corrosion Protection in Metal Construction» of Technical Committee TK-301 «Metal Construction».

E-mail: center_sts@ukr.net

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с автором статьи:
87555, Мариуполь Донецкой обл., ул. Университетская, 7, корп. 11, к. 027, Королёв В.П.
+38(0629) 51-14-25