

В.П. КОРОЛЁВ¹, И.В. КУЩЕНКО¹, Е.А. БОЧАРОВА¹¹ФГБОУ ВО «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Россия

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ КОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИЩЕННОСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. Представлены основные положения научно-методического обоснования коррозионной защищенности стальных конструкций и сооружений. Проанализированы приоритеты совершенствования действующих норм, с учетом научных достижений и международных стандартов. Сформулированы задачи, призванные повысить конкурентоспособность и ресурсосбережение благодаря использованию эффективных мер защиты от коррозии.

Цель исследования – параметризация механизма технического регулирования качества, надежности и безопасности, согласование и применение материалов и технологий, процедур, услуг в сфере защиты от коррозии по требованиям цифрового потребителя. Предложена процессно-ориентированная методология, направленная на постоянное улучшение циклов развития и моделей рационального выбора систем противокоррозионной защиты конструкций. При этом коррозионная защищенность объектов стального строительства определена уровнем надежности и требуемыми параметрами технико-экономической защищенности. Структура управления определена положениями стандарта организации согласно нормам ISO 12944, СП 28.1330.2017 в части защиты стальных конструкций от коррозии.

Проанализированы уровни надежности конструкций и их защитных покрытий с учетом процедур оценки соответствия качества, мониторинга и риск-диагностики в интерпретации метода предельных состояний. Подтверждение соответствия параметров выполнено на основе пяти принципов DMAIC, связанных с определением, измерением, анализом, усовершенствованием и контролем технического состояния конструкций. Представлены примеры статистического оценивания репрезентативных выборок коррозионных воздействий, характеристических значений коррозионной стойкости и долговечности стальных конструкций и их защитных покрытий. Предложены методы функционального и временного резервирования коррозионной защищенности. Выполнены силовые испытания моделей стальных конструкций с коррозионными повреждениями.

Полученные результаты раскрывают неопределенность параметров коррозионного состояния и обеспечивают оценку живучести объектов стального строительства с учетом приемлемого риска. Предложения по параметрическому проектированию рекомендованы для цифровой трансформации системы технико-экономических регуляторов коррозионной защищенности.

Ключевые слова: стальные конструкции, надежность, предельные состояния, коррозионная защищенность, резервирование, живучесть, цифровая трансформация.

V.P. KOROLOV¹, I.V. KUSHCHENKO¹, E.A. BOCHAROVA¹¹Priazovsky State Technical University, Mariupol, Russia

PARAMETERIZATION OF REQUIREMENTS OF CORROSION PROTECTABILITY OF STRUCTURAL STEEL

Abstract. Basic provisions are presented of scientific and methodological substantiation of corrosion protectability of steel structures and installations. Priorities have been analyzed of improving existing codes, taking into account scientific achievements and international standards. Tasks have been formulated for increasing competitiveness and resource saving through the use of effective measures of corrosion protection.

The study is aimed at parameterization of a mechanism of technical regulation of quality, reliability and safety, approval and application of materials and technologies, procedures, services in the field of corrosion protection at the request of a digital consumer. A process-oriented methodology is proposed aimed at a continuous improvement of development cycles and models of the rational choice of systems of corrosion protection of structures. With that, corrosion protection of structural steel is defined by the level of reliability and required parameters of technical and economic protection. The management structure is defined by the provisions of organization standard in accordance with ISO 12944, SP 28.1330.2017 with regard to corrosion protection of structural steel.

The levels have been analyzed of reliability of structures and their protective coatings, with account for the procedures for assessing compliance of quality, monitoring and risk diagnostics based on the limit states method. Parameter compliance is affirmed based on five DMAIC principles related to determination, measurement, analysis, improvement and monitoring technical condition of structures. Examples are presented of statistical estimation of representative samples of corrosion impacts, characteristic values of corrosion resistance and durability of steel structures and their protective coatings. Proposed are methods for functional and time redundancy of corrosion protection assurance. Load tests were carried out of models of steel structures with corrosion damage.

The obtained results reveal uncertainty of parameters of corrosion state and allow assessing structural steel survivability with account for acceptable risk. Suggestions for parametric design are recommended for digital transformation of the system of technical and economic regulators of corrosion protectability.

Keywords: structural steel, reliability, limit state, corrosion protectability, redundancy, survivability, digital transformation.

Введение

Проблема обеспечения конструктивной и технологической безопасности конструкций и сооружений находит отражение при постановке задач теоретических и экспериментальных исследований, результаты которых представлены авторами многочисленных отечественных и зарубежных публикаций [1-5]. Нормативно-правовые акты в соответствии с положениями Градостроительного кодекса Российской Федерации содержат требования технических регламентов, национальных стандартов и сводов правил для определения необходимого уровня надежности и механической безопасности строительных объектов. Вместе с этим, остаются нерешенными вопросы, обусловленные необходимостью совершенствования методов контроля технического состояния конструкций [6-8], технико-экономического обоснования долговечности и живучести [9, 10], оценки рисков аварийных ситуаций [11, 12]. Среди многообразия направлений исследований в области механической безопасности и запасов прочности значительное внимание уделяется мерам по обеспечению коррозионной защищенности стальных конструкций и сооружений [13-16].

Развитие расчетных методов оценки предельных состояний на основе теории надежности включает анализ процессов старения, накопления повреждений и прогрессирующего разрушения [17-20]. При таком подходе исследование параметров, определяющих надежность конструкций, может выполняться при раздельном рассмотрении нагрузок, воздействий и несущей способности с помощью частных коэффициентов. Структура частных коэффициентов в методе предельных состояний предполагает учет влияния коррозии, как фактора, не имеющего приемлемого аналитического описания, путем введения коэффициента условий работы γ_c . Чл. кор. АН СССР Н.С. Стрелецкий, при обосновании расчетных коэффициентов предельного неравенства, указывал: «Учет изменчивости обстоятельств работы конструкции или сооружения является особенностью расчета по предельным состояниям. Изменчивость обстоятельств работы сооружения или конструкции может быть сведена к трем комплексам: изменчивость нагрузок, изменчивость свойств материалов, изменчивость условий работы сооружения, конструкции или их элементов. Особенности работы разного рода конструкций или их элементов характеризуются третьим основным коэффициентом методики расчета по предельным состояниям – коэффициентом условий работы. Этот коэффициент крайне разнообразен и

может быть разбит на несколько категорий. По существу, коэффициент условий работы является экспериментальным коэффициентом и имеет статистическую природу. Очень часто он используется в вопросах, еще не разрешенных расчетным путем, и тогда он неизбежно устанавливается на основе экспериментальных исследований. Логика вопроса требует, чтобы и значение изучаемого фактора в обычных условиях также было получено на базе эксперимента» [1].

На сегодняшний день не в полной степени раскрыты возможности концепции предельных состояний, как основного инструмента для устранения неопределенности параметров коррозионной защищенности. Следует отметить, что применение современных численных методов и алгоритмов анализа долговечности и живучести сдерживается необходимостью постепенного перехода от рекомендательной практики к методологии моделирования бизнес-процессов согласования и применения материалов, процедур, услуг в сфере защиты от коррозии металлических конструкций. Таким образом, совершенствование действующих норм СП 28.1330.2017, с учетом научных достижений, положений международных стандартов и возможностей цифровой трансформации параметров коррозионной защищенности, призвано повысить конкурентоспособность стального строительства благодаря использованию эффективных мер защиты от коррозии. Практическая реализация методов управления коррозионной защищенностью невозможна без внедрения принципов параметрического проектирования, расширяющих использование расчетных критериев долговечности, живучести и ремонтпригодности при сценарном моделировании вариантов технико-экономической защиты строительных объектов на протяжении всего жизненного цикла конструкций [16, 21, 22].

Направление поиска оптимальных решений с необходимым запасом прочности получило развитие в трудах научной школы проф. Н.С. Стрелецкого. Созданию конструкций минимальной стоимости, удовлетворяющих требованиям эксплуатации, надежности и долговечности, способствовали работы проф. Я.М. Лихтарникова, внесшего существенный вклад в теорию проектирования и изготовления экономичных строительных конструкций [23]. Новые реалии, вызванные разгосударствлением основных фондов, привели к глобальному замещению вертикальных горизонтальными хозяйственными связями и перераспределению функций технико-экономического управления технологической безопасностью зданий и сооружений [24]. Понимание приоритетов обеспечения безаварийной эксплуатации и интерес бизнеса к устойчивому развитию промышленных объектов способствовали постановке цели и задач данного исследования.

Цель работы – обоснование технико-экономических параметров коррозионной защищенности для разработки корпоративного регламента управления технологической безопасностью конструкций и сооружений промышленных объектов. Задачами исследования являются:

- дифференциация надежности стальных конструкций и их защитных покрытий в условиях коррозионных воздействий;
- формирование определяющих параметров коррозионного состояния для оценки соответствия проектных показателей качества, надежности и безопасности;
- расчетно-экспериментальное определение долговечности стальных конструкций и их защитных покрытий с учетом приемлемых рисков коррозионного разрушения.

Необходимость разработки программ обеспечения надежности (ПОН) на объектном уровне была вызвана кризисными явлениями в экономике 90-х гг. прошлого столетия. Переход от плановой к рыночной системе управления производственными фондами потребовал внедрения новых форм технического обслуживания конструкций и сооружений по фактическому состоянию. Наиболее остро были поставлены вопросы определения остаточного ресурса и предупреждения аварийных ситуаций, что подтверждалось статистикой чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (рисунок 1). В

этих условиях рядом крупных промышленных предприятий Донбасса были обозначены приоритеты контроля качества, надежности и безопасности конструкций и сооружений на основе анализа рисков технологической безопасности и превентивных мер по их снижению [24].

Настоящая работа отражает практический опыт, полученный при разработке стандарта предприятия СТП 101С-6.3-05 «Обеспечение технологической безопасности при эксплуатации строительных конструкций зданий и сооружений» горно-металлургического комплекса компании «Донецксталь».



Рисунок 1 – Последствия коррозионного разрушения конструкций и сооружений:
а) аварийное разрушение покрытия прокатного цеха; б) обрушение транспортной галереи углеподготовки

В соответствии с техническим заданием требования стандарта предприятия (СТП) должны соответствовать нормам СНиП 2.03.11-85 и предусматривать регулирование эффективности мер по защите от коррозии согласно процедурам EN 1990, ISO9001 и ISO 12944. Таким образом, дополнительные условия СТП призваны обеспечить оценку надежности систем противокоррозионной защиты конструкций (СПЗК) на всех стадиях жизненного цикла. Важной функцией СТП является формирование необходимого минимума знаний и умений персонала, распределение должностных обязанностей и сфер ответственности при регулировании технологической безопасности промышленных объектов.

Модели и методы

Современный мировой опыт проектирования стальных конструкций предполагает задание допусков на коррозию и использование защитных покрытий. Повышение качества защиты от коррозии предусматривает использование мер первичной защиты (требования коррозионной стойкости) и вторичной защиты (требования долговечности защитных покрытий и специальных средств электрохимической защиты). Основными инструментами управления коррозионной защищенностью являются процедуры оценки качества, долговечности и эксплуатационной пригодности [25-27].

Известно, что коррозионная защищенность характеризует способность СПЗК соответствовать заданным требованиям качества, надежности и безопасности на основе организационно-технических мер, установленных для нормального функционирования в течение жизненного цикла промышленного объекта. Сложность задачи дифференциации надежности связана с систематизацией исходных данных, включающих факторы коррозионных воздействий, а также конструктивные параметры средств и методов защиты от коррозии. Надежность представляет совокупность количественных и (или) качественных

требований к безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Для оценки коррозионной защищенности выполнено объединение классификационных признаков коррозионных сред СНиП 2.03.11-85 и ISO 12944 (таблица 1), а комплексным показателем надежности принят коэффициент готовности, отражающий свойства безотказности и ремонтпригодности [22].

Таблица 1 – Классификационные признаки коррозионных сред

Обозначение степени агрессивности по ДСТУ Б В.2.6-193	Показатель коррозионной стойкости: стали алюминия K , мм/год	Характеристическое значение годовых коррозионных потерь стали С 235, A_n , г/м ² год	Обозначение степени агрессивности по СНиП 2.03.11	Обозначение категории коррозии по ISO 12944-2 A_n , г/м ² год
A1 Неагрессивная (OA)	до 0,01 до 0,001	до 80	B1 неагрессивная	C1 очень низкая ≤ 10
A2 Слабоагрессивная (CA)	0,01 ... 0,05 0,001...0,005	80 ... 400	B2 слабоагрессивная	C2 низкая 10 ... 80
A3 Низкоагрессивная (HA)	0,05 ... 0,08 0,005.. 0,008	400 ... 650	B3 среднеагрессивная	C2 низкая 80 ... 200
A4 Высокоагрессивная (BA)	0,08 ... 0,20 0,008...0,02	650 ... 1500,0		C3 низкая 200 ... 400
A5 Особо высокоагрессивная (OBA)	0,20 ... 0,50 0,02.... 0,05	1500 ... 3900,0		C4 высокая 400 ... 650
A6 Сильноагрессивная (CA)	свыше 0,50 свыше 0,05	свыше 3900,0	B4 сильноагрессивная	C5-1 промышленная 650 ... 1500 C5-M морская 650 ... 1500
				–
				–

Общие проектные критерии для подтверждения соответствия установленных показателей коррозионной стойкости и долговечности СПЗК представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Обобщенная матрица уровня надежности СПЗК

Обозначение воздействий	Интервальные оценки коэффициента готовности противокоррозионной защиты (K_g) и степень агрессивности воздействий, (K , мм/год)				
	$0 < K_g \leq 0,1$	$0,1 < K_g \leq 0,3$	$0,3 < K_g \leq 0,5$	$0,5 < K_g \leq 0,7$	$0,7 < K_g \leq 1,0$
CA	Слабоагрессивные, $0,01 < K \leq 0,05$				
	KI	ZIV	ZIII	ZII	ZI
HA	Низкоагрессивные, $0,05 < K \leq 0,15$				
	KII	KI	ZIV	ZIII	ZII
BA	Высокоагрессивные, $0,15 < K \leq 0,30$				
	KIII	KII	KI	ZIV	ZIII
OBA	Очень высокоагрессивные, $0,30 < K \leq 0,50$				
	KIV	KIII	KII	KI	ZIV
CA	Сильноагрессивные, $K > 0,50$				
	KV	KIV	KIII	KII	KI

Коэффициент готовности стальных конструкций (K_g), характеризующий параметры конструктивных и технологических мер первичной и вторичной защиты по коррозионной стойкости и долговечности, определяется по формуле (1):

$$K_g = \frac{T_{zk} + T_{zn}}{T_{zk} + nT_{zn}}; \quad (1)$$

где T_{zk} – срок службы (год) стальных конструкций по показателю коррозионной стойкости (первичная защита); T_{zn} – расчетный срок службы (год) покрытий с доверительной вероятностью $\gamma=0,95$ по результатам испытаний при отказе по обобщенному показателю защитных свойств (A_z) или критической толщине подпленочной коррозии (h_k , мкм); n – количество ремонтных циклов возобновления противокоррозионной защиты при установленном сроке службы объекта.

В соответствии с представленным подходом, основным показателем агрессивных сред является характеристическое значение годовых коррозионных потерь A_n , г/м²год, условно приведенное к незащищенной поверхности стали класса С 235 (см. таблицу 1).

Расчетные годовые коррозионные потери A (г/м² год) определяют по формуле (2):

$$A = \gamma_{fk} \gamma_{mk} A_n \tau / 8760, \quad (2)$$

где τ – продолжительность воздействия коррозионных компонентов в часах за год; γ_{fk} – коэффициент надежности по воздействиям, зависящий от степени агрессивности и категории размещения конструкций; γ_{mk} – коэффициент надежности по материалу, зависящий от группы коррозионной стойкости строительных сталей.

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} . Выборки экспериментальных данных коррозионной стойкости формируются по результатам выполнения определительных (ускоренных, стендовых или натурных) испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ 9.040, ГОСТ 9.401, ГОСТ 6992. Практический пример зонирования коррозионных потерь на примере ряда производственных объектов представлен на рисунке 2.

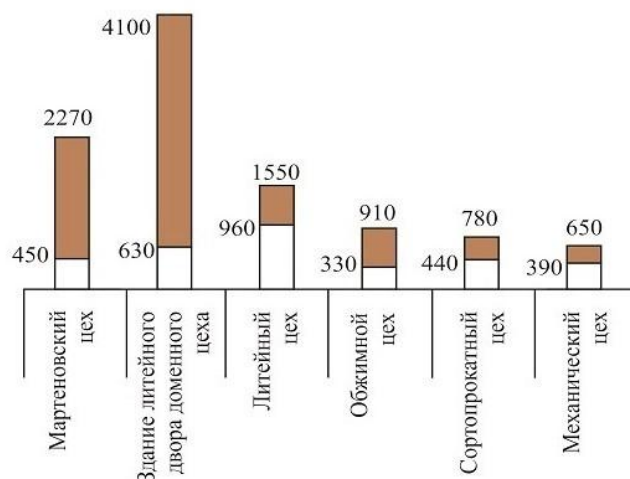


Рисунок 2 – Репрезентативные значения характеристических значений годовых коррозионных потерь (A_n , г/м²) по данным зонирования режима эксплуатации зданий и сооружений металлургического производства

Согласно методике предельных состояний допустимые и недопустимые (запредельные) эксплуатационные характеристики выявляются с использованием определительных параметров коррозионного состояния (ОПКС) конструкций (таблица 3). Категория ответственности устанавливает контрольные нормативы для оценивания предельных параметров коррозионного состояния в расчетах на коррозионную стойкость и

долговечность СПЗК. Переход через предельное состояние соответствует одному из видов отказа по показателям живучести и ремонтпригодности.

Таблица 3 – Определительные параметры коррозионного состояния СПЗК

Шкала стойкости металлов и покрытий				Категория ответственности конструкций	Коэффициенты надежности	
Группа стойкости по ГОСТ 13819	Оценка стойкости, балл	Глубина поражения, мм/год	Класс первичной и вторичной защиты по СНиП 2.03.11-85		Первичной защиты, $\gamma_{\text{зк}}$	Вторичной защиты, γ_{zn}
Нестойкие (IV)	8	1 – 5	I	C4	От 0,80 до 0,85	От 0,85 до 0,90
	7	0,5 – 1				
Пониженно-стойкие (III)	6	0,1-0,5	II	C3	» 0,85 » 0,90	»0,90 »0,95
	5	0,05-0,1				
Удовлетворительно стойкие (II)	4	0,01-0,05	III	C2	»0,90 »0,95	»0,95 »0,99
	3	0,005-0,01				
Стойкие (I)	2	0,001-0,005	IV	C1	»0,95 »0,99	»0,99 »1,00
	1	Менее 0,001				

При постановке задач параметрического проектирования СПЗК используются критерии надежности I уровня при раздельном рассмотрении нагрузок, воздействий и несущей способности. Коэффициент надежности коррозионного состояния (γ_{zf}) устанавливает изменение параметров однородных конструктивных элементов. Формирование расчетных моделей и расчетных ситуаций осуществляется топологическими методами по данным анализа причинно-следственных связей СПЗК. Управление технологической безопасностью выполняется на основе анализа рисков (R_i , балл) и диагностики живучести ($T_{\text{жп}}$, год) с учетом коэффициента обратной связи (ψ_m) негативных внешних воздействий [16]. Таким образом, оценка предельных состояний по признакам коррозионной опасности позволяет формировать меры технологической безопасности, предупреждения экологических и техногенных угроз, снижения экономических рисков, связанных с коррозионным разрушением (таблица 4).

Таблица 4 – Классификация признаков технико-экономической защищенности промышленных объектов

Состояние СПЗК	Класс опасности	Наименование риска	Характеристика потерь	Уровень риска (R_i , балл)	Размер ущерба, МРОТ*
Коррозионная опасность	1	Катастрофичный	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

Логическая последовательность мер СТП, регламентирующих действия инженерно-технического персонала на основе анализа рисков коррозионного разрушения конструкций и сооружений, представлена на схеме (рисунок 3).

В контексте требований качества, надежности и безопасности строительных металлоконструкций первостепенное значение приобретает проведение определительных коррозионных и силовых испытаний. Управление проектными решениями включает отработку спецификаций с учетом заданного уровня надежности СПЗК и результатов подтверждения соответствия ОПКС по данным стандартных методов испытаний и измерений [21].

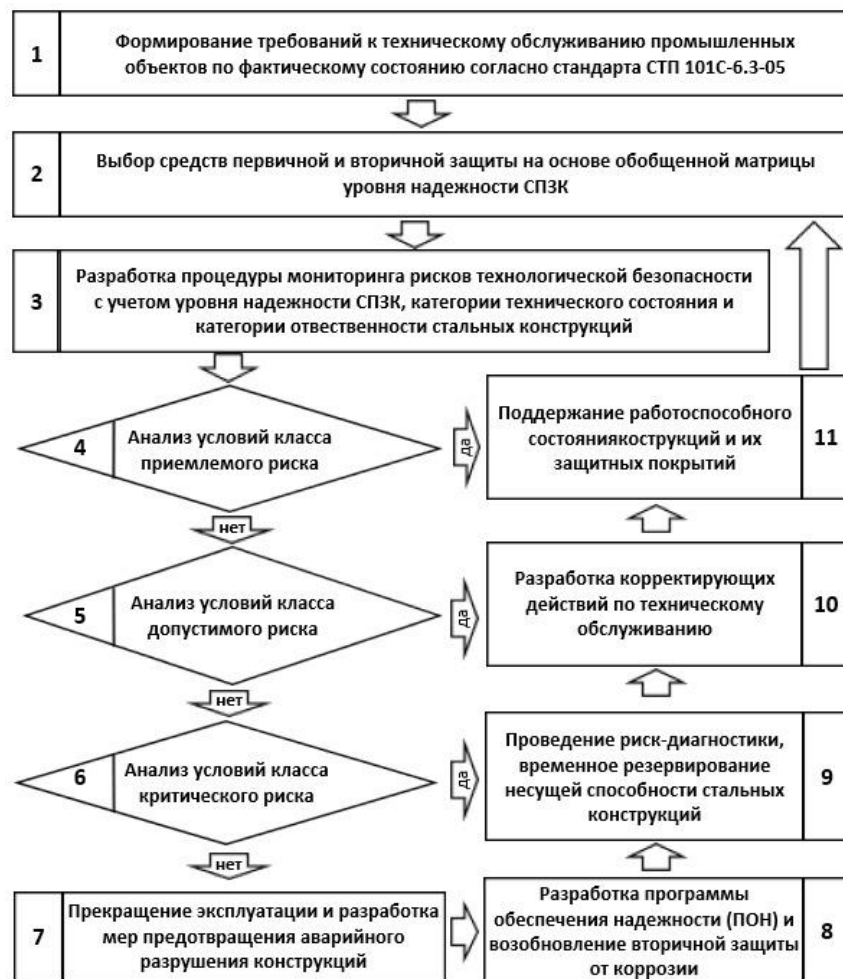


Рисунок 3 – Условия регулирования уровня надежности СПЗК

Результаты исследования и их анализ

По требованиям используемых в Еврокодах, негативные воздействия в условиях старения материалов, коррозии или усталости предлагается учитывать путем надлежащего выбора материалов (EN 1993-1-4 и EN 1993-1-10), или путем конструктивного запаса и выбора соответствующей системы защиты от коррозии. В соответствии с нормами СП 28.1330.2017 прогнозируемый срок службы покрытия устанавливается по результатам ускоренных климатических испытаний образцов покрытий, представляющих собой фрагменты реальных конструкций с покрытиями. Для проектных спецификаций стандарта ISO 12944 установлены интервальные диапазоны срока службы (низкий, средний, высокий и очень высокий), не являющиеся «гарантированной долговечностью» защитных покрытий.

При разработке СТП использованы методические подходы, изложенные в работах [15], позволяющие производить расчетно-экспериментальную оценку долговечности

стальных конструкций и их защитных покрытий по репрезентативным данным ускоренных и силовых испытаний фрагментов конструкций.

Для оценки долговечности произведена оценка несущей способности путем сопоставления расчетной нагрузки с контрольной разрушающей нагрузкой на примере стальных пространственно-стержневых конструкций (рисунок 4).

а)



б)



Рисунок 4 – Определительные испытания пространственно-стержневых конструкций:
а) ферма-балка; б) стойка

Для фермы-балки (см. рисунок 4 а) установлена предельная нагрузка пространственно-стержневой балочной конструкции ($N=70$ кН), связанная с потерей местной устойчивости опорного раскоса при отношении резерва надежности $\Gamma=1,40$. Отказ пространственно-стержневой стойки при внецентренном нагружении ($N=240$ кН) вызван потерей общей устойчивости пояса при отношении резерва надежности $\Gamma=1,33$ [24].

Параметры напряженно-деформированного состояния в расчетах на коррозионную стойкость и долговечность представлены зависимостями:

I предельное состояние (3), (4):

$$A_f = (1 - \gamma_{zk})mt; \quad (3)$$

$$N/\gamma_{zk} \leq \Phi; \quad (4)$$

II предельное состояние (5), (6):

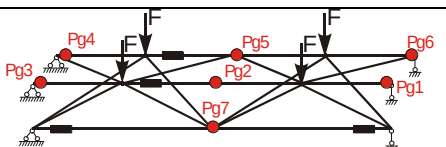
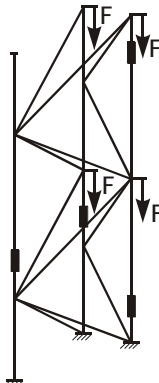
$$T_{zk} = \sqrt[3]{A_f / \gamma_{fk} A_n}; \quad (5)$$

$$T_{zn} = \sqrt[3]{\gamma_{zn} K_p / A_n}; \quad (6)$$

где Φ – предельное усилие, кН; N – наибольшее расчетное усилие, кН; A_f – заданная фиктивная коррозионная нагрузка, г/год/м²; A_n – характеристическое значение коррозионных потерь, г/(м² год); c – коэффициент кинетики коррозионного износа, принимаемый с учетом группы коррозионной стойкости стали; $m=7,85 \cdot 10^4$ – переводной коэффициент коррозионных потерь, г/см³; t – приведенная толщина сечения элемента; K_p – контрольный норматив отказа системы защитного покрытия по результатам испытаний (г/м²).

Расчет долговечности конструкций и их защитных покрытий (таблица 5) связан с установлением уровня надежности (см. таблицу 2), что предполагает определение коэффициента готовности (K_g).

Таблица 5 –Определение долговечности с учетом мер первичной и вторичной защиты

No п/п	Расположение конструкции (прогибомеров) при испытании	Параметры отказа конструкции			A_n , г/м ²	Коэффициент надежности		T_{zk} , год
		N, кН	Ф, кН	Г		Первич- ной защиты, γ_{zk}	Вторич- ной защиты, γ_{zn}	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		50	70	1,40	2150	0,95	0,92	50
2		180	240	1,33				52,5

Преимуществом расчетно-аналитического обоснования требований долговечности к выбору защитных покрытий является возможность задания контрольного норматива (K_p , г/м²) в зависимости от уровня коррозионной опасности (KI – KV) или защищенности (ZI – ZIV) строительного объекта. Таким образом, показатели качества, надежности и безопасности СПЗК получают подтверждение соответствия на основе ускоренных или стендовых испытаний фрагментов конструкций и их защитных покрытий по условиям ОПКС (см. таблицы 1 – 4). Более подробно разработанная методика в части оценивания эксплуатационной пригодности и долговечности защитных покрытий на основе контроля коэффициента надежности (γ_{zn}), степени агрессивности (A_n , г/м²) и контрольного норматива отказа системы защитного покрытия (K_p , г/м²) с учетом требований определительных (ускоренных по ГОСТ 9.401, стендовых по ГОСТ 6992) испытаний представлена в работе [21]. В целом, положения СТП по регулированию уровня надежности СПЗК обеспечивают технико-экономическое обоснование коррозионной защищенности и технологической безопасности конструкций и сооружений промышленных объектов. Дифференциация надежности по признакам коррозионного состояния позволяет выполнять систематизацию данных коррозионной стойкости, долговечности и живучести для анализа и обоснования рациональных решений продления ресурса стальных конструкций при эксплуатации и реконструкции промышленных объектов.

Выводы

1. Важность и актуальность проблемы предотвращения коррозионного разрушения стальных конструкций не требует всестороннего анализа, так как эти задачи рассматриваются как приоритетное направление устойчивого развития всех промышленно развитых стран. Коррозия связана с последствиями значительного ущерба от природных и техногенных аварий и катастроф. Вместе с этим, не меньший урон приносит недостаточная осведомленность и отсутствие действенных механизмов технико-экономической защиты конструкций и сооружений, что вызывает нерациональное использование материальных и финансовых ресурсов.

2. В результате исследований предложена методика расчетно-экспериментальной оценки коррозионной защищенности, основанная на параметризации определяющих признаков коррозионного состояния (см. таблицы 1 – 4) для регулирования уровня надежности первичной и вторичной защиты от коррозии. Процессный подход предполагает задание уровня надежности, выбор категорий ответственности и расчетных показателей СПЗК, технико-экономическое обоснование эксплуатационных рисков, оценку индексов эффективности развития средств и методов противокоррозионной защиты стальных конструкций. Методика реализована при разработке стандарта предприятия СТП 101С-6.3-05 для обеспечения технологической безопасности конструкций, зданий и сооружений горно-металлургического комплекса компании «Донецксталь».

3. Дифференциация уровней надежности СПЗК произведена на основе положений метода предельных состояний путем построения структуры частных коэффициентов, устраняющих неопределенность расчетных моделей и ситуаций при численном моделировании факторов коррозионных воздействий, параметров конструктивной и технологической безопасности на протяжении жизненного цикла конструкций. В качестве комплексного показателя надежности использован коэффициент готовности (K_g), включающий требования по безотказности и ремонтпригодности.

4. Выполнена экспериментальная оценка несущей способности на примере определительных испытаний пространственно-стержневых конструкций. Выявленные отказы элементов фермы-балки и стойки, связанные с потерей местной и общей устойчивости поясов, позволили произвести расчет отношения резерва надежности (Γ) и определить долговечность первичной защиты (T_{zk}) конструкций. При этом варьирование сроком службы (T_{zn}) при выборе вторичной защиты, создает возможность регулирования уровня коррозионной опасности ($KI - KV$) или защищенности ($ZI - ZIV$) строительного объекта (см. таблицу 2). Таким образом, получают развитие принципы функционального и временного резервирования долговечности и живучести стальных конструкций в условиях коррозионных воздействий.

5. Представленная практика использования стандарта предприятия СТП 101С-6.3-05, в части параметризации коррозионной защищенности стальных конструкций, является важным шагом цифровой трансформации методов управления рисками при эксплуатации и реконструкции гражданских и промышленных объектов. Устранение неопределенности показателей коррозионного состояния конструкций позволит усовершенствовать правовую, координирующую, контрольную и инвестиционно-технологическую составляющую, сбалансировать интересы государства, эффективных собственников, производственного менеджмента в сфере стального строительства и общества. Расширению осведомленности в вопросах управления коррозионной защищенности может способствовать деятельность научно-образовательного центра (НОЦ) «Техноресурс», созданного в Приазовском государственном техническом университете в 2014 г. и испытательной лаборатории «Антикор-Дон», аккредитованной по стандарту ISO/IEC 17025.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стрелецкий Н.С. Избранные труды. Москва: Стройиздат, 1975. 422 с.
2. Mrázik A. Teória sporahlivosti ocerových konštrukcií. Sloven. akad. vied. Úst. stavebníctva a architektúry SAV. Bratislava: VEDA, 1987. 360 p.
3. Meinen N.E., Steenbergen R.D.J.M. Reliability levels obtained by Eurocode partial factor design – A discussion on current and future reliability levels // HERON. 2018. Vol. 63. No. 3. Pp. 243-302. URL: <https://heronjournal.nl/63-3/63-3.ht>
4. Pichugin S.F. Reliability estimation of industrial building structures // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 83(7). Pp. 24-37. doi:10.18720/MCE.83.3.
5. Solovyev S.A., Solovyeva A.A. Structural reliability analysis using evidence theory and fuzzy probability distributions // Magazine of Civil Engineering. 2021. No. 107(7). Article No. 10704. doi:10.34910/MCE.107.4.
6. Mammedov K.A., Hamidova N.S., Huseynova U.K. Diagnosis of the corrosion state of hydraulic structures in the Caspian Sea in order to prevent environmental damage // Bulletin of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. 2020. Vol. 3. No. 385. Pp. 111-118. URL: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1467.76>
7. Zajec B. et al. Corrosion Monitoring of Steel Structure Coating Degradation // Materials Science. Tehnički Vjesnik [Technical Gazette]. 2018. No. 25(5). Pp. 1348-1355. doi:10.17559/TV-20170206004112.
8. Лапидус А.А., Топчий Д.В. Организация работ по обследованию зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 3. С. 12-15. doi:10.33622/0869-7019.2023.03.12-15.
9. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability of structural systems of buildings with special effects // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 81(5). Pp. 73-80. doi:10.18720/MCE.81.8.
10. Андросова Н.Б., Колчунов В.И. Живучесть каркасно-стержневого железобетонного здания при аварийном воздействии // Строительство и реконструкция. 2021. № 5. С. 40-50. URL: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-97-5-40-50>
11. David J. Smith. Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers. Butterworth-Heinemann, 2021. 516 p. URL: https://www.amazon.com/Reliability-Maintainability-Risk-Practical-Engineers/dp/0323912613/ref=sr_1_8?crid=3I3X9NQDEGOAI&keywords=economic+risks+industrial+facilities&qid=1676202320&s=books&sprefix=economic+risks+industrial+facilities%2Cstripbooks-intl-sh
12. Alekseytsev A.V., Gaile L., Drukis P. Optimization of steel beam structures for frame buildings subject to their safety requirements // Magazine of Civil Engineering. 2019. No. 91(7). Pp. 3-15. doi:10.18720/MCE.91.1.
13. Горохов Е.В. [и др.]. Долговечность стальных конструкций в условиях реконструкции. Москва: Стройиздат, 1994. 488 с.
14. Di Sarno L., Majidian A., Karagiannakis G. The Effect of Atmospheric Corrosion on Steel Structures: A State-of-the-Art and Case-Study // Buildings. 2021. No. 11(12):571. URL: doi.org/10.3390/buildings11120571.
15. Федотов С.Д., Улыбин А.В., Шабров Н.Н. О методике определения коррозионного износа стальных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 1. С. 12-20. doi:10.5862/MCE.36.2.
16. Королёв В.П. Методический подход к обеспечению работоспособности металлоконструкций в условиях коррозионной опасности // Строительство и реконструкция. 2019. № 4(84). С. 70-82. doi:10.33979/2073-7416-2019-84-4-70-82.
17. Mohan Dr.S. J., Chitra R., Thendral S. Limit State Method of Design for Steel Structures // International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2018. Vol. 119. No. 12. Pp. 9169-9181.
18. Zolina T.V., Sadchikov P.N. Residual resource of a one-storey steel frame industrial building constructed with bridge cranes // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 84 (8). Pp. 150-161. doi:10.18720/MCE.84.15.
19. Туснин А.Р., Бергер М.П. Зависимость коэффициента динамичности от жесткости ферм при разных видах локальных разрушений // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 2. С. 202–217. doi:10.22227/1997-0935.2023.2.202-217.
20. Топчий Д.В. Перспективы развития системы образования специалистов строительного контроля // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 3. С. 4-11. doi:10.33622/0869-7019.2023.03.04-11.
21. Королёв В.П., Герман Г.А. Формирование проектных требований на основе управления коррозионной защищенностью стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 4. С. 518–532. doi:10.22227/1997-0935.2020.4.518-532.
22. Королёв В.П., Рыженков А.А., Королёв П.В. Эволюция концептуальных подходов к управлению коррозионной защищенностью стальных конструкций и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 8. С. 32-40. doi:10.33622/0869-7019.2022.08.32-40.
23. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. Москва: Стройиздат, 1979. 319 с.
24. Шимановский А.В. [и др.]. Техническая диагностика и предупреждение аварийных ситуаций конструкций зданий и сооружений. Киев: Сталь, 2008. 463 с.
25. MacGinley T.J. Steel Structures. Practical design studies. London and New York: E&FN SPON, 1998. 184 p.

26. AISC 325-17: Steel Construction Manual // American Institute of Steel Construction. 15th Edition. 2017. 2324 p. URL: <https://www.casresource.com/product/aisc-325-17-steel-construction-manual-fifteenth-edition/>
27. Shopov A. Theoretical-Computation Conception for Forecasting on Corrosion Influence into Steel Elements at Sustainable Development // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). 2019. Vol. 8. Issue 8. June. Pp. 2253-2261. URL: <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v8i8/H7152068819.pdf>

REFERENCES

1. Streleckij N.S. Izbrannye Trudy [Selected works]. Moscow: Strojizdat, 1975. 422 p.
2. Mrázik A. Teória sporahlivosti ocerových konštrukcií. Sloven. akad. vied. Úst. stavebníctva a architektúry SAV. Bratislava: VEDA, 1987. 360 p.
3. Meinen N.E., Steenbergen R.D.J.M. Reliability levels obtained by Eurocode partial factor design – A discussion on current and future reliability levels. *HERON*. 2018. Vol. 63. No 3. Pp. 243-302. URL: <https://heronjournal.nl/63-3/63-3.ht>
4. Pichugin S.F. Reliability estimation of industrial building structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No 83(7). Pp. 24-37. doi:10.18720/MCE.83.3.
5. Solovyev S.A., Solovyeva A.A. Structural reliability analysis using evidence theory and fuzzy probability distributions. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. No 107(7). Article No 10704. doi:10.34910/MCE.107.4.
6. Mammedov K.A., Hamidova N.S., Huseynova U.K. Diagnosis of the corrosion state of hydraulic structures in the Caspian Sea in order to prevent environmental damage. *Bulletin of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. 2020. Vol. 3. No 385. Pp. 111-118. URL: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1467.76>
7. Zajec B. et al. Corrosion Monitoring of Steel Structure Coating Degradation. *Materials Science. Tehnički Vjesnik [Technical Gazette]*. 2018. No 25, 5. Pp. 1348-1355. doi:10.17559/TV-20170206004112.
8. Lapidus A. A., Topchiy D. V. Organizaciya rabot po obsledovaniyu zdaniy i sooruzhenij [Organization of Works on Inspection of Buildings and Structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*. 2023. No 3. Pp. 12-15. (In Russian). doi:10.33622/0869-7019.2023.03.12-15.
9. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability of structural systems of buildings with special effects. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No 81(5). Pp. 73–80. doi:10.18720/MCE.81.8.
10. Androsova N.B., Kolchunov V.I. Zhivuchest' karkasno-sterzhnevogo zhelezobetonnoho zdaniya pri avarijnom vozdejstvii [Survivability of the frame-rod reinforced concrete building framework in accidental action]. *Stroitel'stvo rekonstrukciya [Building and Reconstruction]*. 2021. No 5. Pp. 40-50. URL: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-97-5-40-50>.
11. David J. Smith. Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers. Butterworth-Heinemann, 2021. 516 p. URL: https://www.amazon.com/Reliability-Maintainability-Risk-Practical-Engineers/dp/0323912613/ref=sr_1_8?crid=3I3X9NQDEGOAI&keywords=economic+risks+industrial+facilities&qid=1676202320&s=books&prefix=economic+risks+industrial+facilities%2Cstripbooks-intl-sh
12. Alekseytsev A.V., Gaile L., Drukis P. Optimization of steel beam structures for frame buildings subject to their safety requirements. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. No 91(7). Pp. 3-15. doi:10.18720/MCE.91.1.
13. Gorokhov E.V. [at al]. Dolgovechnost' stal'nykh konstrukcij v usloviyah rekonstrukcii. [Durability of steel structures under reconstruction conditions]. Moscow: Strojizdat, 1992. 488 p.
14. Di Sarno L., Majidian A., Karagiannakis G. The Effect of Atmospheric Corrosion on Steel Structures: A State-of-the-Art and Case-Study. *Buildings*. 2021. No 11(12). P. 571. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings11120571>
15. Fedotov S.D., Ulybin A.V., Shabrov N.N. O metodike opredeleniya korrozionnogo iznosa stal'nykh konstrukcij [The methodology of determining the corrosion of steel structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal [Magazine of Civil Engineering]*. 2013. No 1. Pp. 12-20. doi:10.5862/MCE.36.2.
16. Korolov V.P. Metodicheskij podhod k obespecheniyu rabotosposobnosti metallokonstrukcij v usloviyah korrozionnoj opasnosti [Methodological approach to ensuring the serviceability of metal structures under corrosion hazard conditions]. *Stroitel'stvo i Rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*. 2019. No 4 (84). Pp. 70-82. doi:10.33979 / 2073-7416-2019-84-4-70-82.
17. Mohan Dr. S. J., Chitra R., Thendral S. Limit State Method of Design for Steel Structures. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2018. Vol. 119. No 12. Pp. 9169-9181.
18. Zolina T.V., Sadchikov P.N. Residual resource of a one-storey steel frame industrial building constructed with bridge cranes. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No 84(8). Pp. 150-161. doi:10.18720/MCE.84.15.
19. Tusnin A.R., Berger M.P. Zavisimost' koefficienta dinamichnosti ot zhestkosti ferm pri raznykh vidah lokal'nykh razrushenij [Dependence of the dynamic coefficient on rigidity of trusses in case of versatile local failures]. *Vestnik MGSU [Vestnik MGSU]*. 2023. No 18(2):202-217. doi:10.22227/1997- 0935.2023.2.202-217.
20. Topchiy D. V. Perspektivy razvitiya sistemy obrazovaniya specialistov stroitel'nogo kontrolya [Prospects for the Development of the Education System for Construction Control Specialists]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*. 2023. No 3. Pp. 4-11. doi:10.33622/0869-7019.2023.03.04-11.

21. Korolov V.P., German G.A. Formirovanie proektnykh trebovanij na osnove upravleniya korrozionnoj zashchishchennost'yu stal'nykh konstrukcij [Formation of design requirements based on the management of structural steel corrosion protectability]. *Vestnik MGSU [Vestnik MGSU]*. 2020. Vol. 15. No 4. Pp. 518-532. doi:10.22227/1997-0935.2020.4.518-532.
22. Korolov V.P., Ryzhenkov A.A., Korolov P.V. Evolyuciya konceptual'nykh podhodov k upravleniyu korrozionnoj zashchishchennost'yu stal'nykh konstrukcij i sooruzhenij [Evolution of Conceptual Approaches of Management of Corrosion Protection of Steel Structures and Facilities]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo [Industrial and civil Engineering]*. 2022. No 8. Pp. 32 – 40. doi:10.33622/0869-7019.2022.08.32-40
23. Likhtarnikov Ya.M. Variantnoye proyektirovaniye i optimizatsiya stalnykh konstruksiy [Trial design and optimization of structural steel]. Moscow: Stroyizdat, 1979. 319 p.
24. Shimanovsky A.V. [at al]. Tekhnicheskaya diagnostika i preduprezhdenie avariynykh situacij konstrukcij zdaniy i sooruzhenij [Technical diagnostics and prevention of accident cases for buildings and installations]. Kiev: Stal' [Steel], 2008. 462 p.
25. MacGinley T.J. Steel Structures. Practical design studies. London and New York: E&FN SPON, 1998. 184 p.
26. AISC 325-17: Steel Construction Manual. *American Institute of Steel Construction*. 15th Edition. 2017. 2324 p. URL: <https://www.casresource.com/product/aisc-325-17-steel-construction-manual-fifteenth-edition/>
27. Shopov A. Theoretical-Computation Conception for Forecasting on Corrosion Influence into Steel Elements at Sustainable Development *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2019. Vol. 8. Issue 8. June. Pp. 2253-2261. URL: <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v8i8/H7152068819.pdf>

Информация об авторах:

Королёв Владимир Петрович

ФГБОУ ВО «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительство, архитектура и дизайн».
E-mail: korolyovskif@yandex.ru

Кущенко Игорь Владимирович

ФГБОУ ВО «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Россия,
кандидат технических наук, и.о. ректора Приазовского государственного технического университета.
E-mail: kigorvlad@yandex.ru

Бочарова Елена Анатольевна

ФГБОУ ВО «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Россия,
старший преподаватель кафедры «Строительство, архитектура и дизайн».
E-mail: elena270915v@yandex.ru

Information about authors:

Korolov Vladimir P.

Priazovsky State Technical University, Mariupol, Russia,
doctor in technical sciences, professor, professor of department of Civil Engineering, Architecture and Design.
E-mail: korolyovskif@yandex.ru

Kushchenko Igor V.

Priazovsky State Technical University, Mariupol, Russia,
candidate in technical sciences, acting rector of Priazovsky State Technical University.
E-mail: kigorvlad@yandex.ru

Bocharova Elena An.

Priazovsky State Technical University, Mariupol, Russia,
senior lecturer of department of Civil Engineering, Architecture and Design.
E-mail: elena270915v@yandex.ru