

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ / CONSTRUCTION STRUCTURES,
BUILDINGS AND STRUCTURES**

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2023.41.2>

**МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ПРИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Научная статья

Королёв В.П.^{1,*}, Кущенко И.В.²

²ORCID : 0000-0002-3338-6793;

^{1,2} Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (korolyovskif[at]yandex.ru)

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы управления рисками технико-экономической защищённости с учетом опасности коррозионного разрушения конструкций и сооружений. Показано, что предотвращение аварийных ситуаций связано с реализацией требований конструктивной и технологической безопасности. Определены задачи развития инженерных, эксплуатационных, управленческих знаний и компетенций на основе существующей практики бизнес-процессов. Обоснован программно-целевой подход для оценки, анализа и принятия решений, устранения угроз и минимизации возможного ущерба.

Выполнена дифференциация уровня надёжности конструкций и сооружений для управления циклами развития мер защиты от коррозии. Представлены результаты системного анализа характера и интенсивности коррозионного разрушения конструкций в условиях длительной эксплуатации. Сформированы модели определительных параметров коррозионного состояния для оценки предельных состояний с учетом основных типов коррозионно-механического разрушения. Развита положения мониторинга и риск-диагностики, систематизированы данные сценарных вариантов анализа технического состояния корродирующих конструкций.

Определено понятие потерь от коррозии, как индексного критерия принятия решений с учетом технико-технологических рисков. Раскрыты методические аспекты управления рисками технологической безопасности при эксплуатации и реконструкции промышленных объектов. Предложены практические меры по совершенствованию стратегии предотвращения коррозионного разрушения конструкций и сооружений путем концентрации ресурсов в условиях высокого риска.

Ключевые слова: стальные конструкции, коррозионная опасность, расчет по предельным состояниям, технико-экономическая защищенность, управление технологической безопасностью, промышленные объекты.

**METHODOLOGICAL ASPECTS OF CORROSION HAZARD PREVENTION DURING OPERATION OF STEEL
STRUCTURES OF INDUSTRIAL FACILITIES**

Research article

Korolyov V.P.^{1,*}, Kushchenko I.V.²

²ORCID : 0000-0002-3338-6793;

^{1,2} Priazovsky State Technical University, Mariupol, Russian Federation

* Corresponding author (korolyovskif[at]yandex.ru)

Abstract

The article examines the issues of risk management of technical and economic security, taking into account the danger of corrosion damage to structures and facilities. It is demonstrated that prevention of emergency situations is connected with the implementation of structural and technological safety requirements. The tasks of engineering, operational, managerial knowledge and competences development on the basis of the existing business process practice are defined. The programme-targeted approach for evaluation, analysis and decision-making, elimination of threats and minimization of possible damage is substantiated.

The differentiation of the reliability level of structures and facilities for managing the development cycles of corrosion protection measures is carried out. The results of system analysis of the nature and intensity of corrosion damage to structures under conditions of long-term operation are presented. Models of determinative parameters of corrosion state for evaluation of limit states taking into account the main types of corrosion-mechanical destruction are formulated. The provisions of monitoring and risk-diagnostics are developed, the data of scenario variants of analysis of technical condition of corroding structures are systematized.

The concept of corrosion losses as an index criterion for decision-making taking into account technical and technological risks is defined. Methodological aspects of technological safety risk management in the operation and reconstruction of industrial facilities are disclosed. Practical measures to improve the strategy of preventing corrosion damage to structures and facilities by concentrating resources in high-risk conditions are proposed.

Keywords: steel structures, corrosion hazard, limit state calculations, technical and economic protection, process safety management, industrial facilities.

Введение

Коррозионное разрушение является одним из основных недостатков строительных металлоконструкций для устранения которого требуются дополнительные затраты материальных ресурсов. В настоящее время около 50% металлофонда зданий и сооружений различных отраслей промышленности и сельского хозяйства работает в условиях средне- и сильноагрессивных воздействий. По данным экспертных оценок потери от коррозии составляют 10-15% всего производимого черного металла или 4-5% национального дохода [1], [2].

Проблема предотвращения коррозионного разрушения является важной составной частью комплексной задачи обеспечения технологической безопасности промышленных объектов. Кроме технических аспектов, связанных с безопасностью эксплуатации, обеспечение сохранности основных фондов имеет важный экологический характер. Аварии и разрушения металлоконструкций в результате низкого качества противокоррозионной защиты сопровождаются загрязнением среды и ухудшением экологической обстановки промышленных регионов.

В последние годы все более очевидной становится тенденция совершенствования нормативно-технических требований в области конструктивной безопасности при эксплуатации зданий и сооружений [3], [4], [5], [6], [7]. Важным показателем механической прочности, устойчивости и экологической безопасности является уровень коррозионной опасности строительного объекта, определяющий критические интервалы снижения эксплуатационных характеристик конструкций и сооружений [8]. Вместе с этим, рекомендации Пособия [9] требуют актуализации в соответствии с положениями Градостроительного кодекса Российской Федерации, требованиями технических регламентов, национальных стандартов и сводов правил по поддержанию требуемого уровня надежности и механической безопасности [10], [11].

Как известно, безопасность характеризует техническое состояние, при котором объект соответствует функциональному назначению при наличии допустимого уровня риска. Нормальная эксплуатация зданий и сооружений в условиях деградиационных процессов обеспечивается мерами в соответствии с принятой концепцией технического обслуживания:

- *f* – стратегии отказоустойчивости в течение всего жизненного цикла конструкций (*fault-tolerance*);
- *s* – стратегии обеспечения работоспособности по фактическому состоянию конструкций (*survivability*).

В новых экономических реалиях выбор стратегии технического обслуживания конструкций и сооружений связан с управлением эксплуатационными рисками объектов недвижимости для извлечения прибыли собственником при реализации бизнес-процессов на рынке товаров и услуг. Поэтому эффективный собственник должен иметь соответствующий инструментарий для измерения, оценки и принятия решений в соответствии целями, задачами и условиями предпринимательской деятельности и требованиями институциональных органов государственной власти. Многокритериальный подход к управлению надежностью конструкций и сооружений может быть реализован на основе программно-целевой стратегии управления технологической безопасностью промышленных объектов.

Цель статьи – совершенствование методического обоснования методов, моделей, механизма и практических рекомендаций по предотвращению коррозионной опасности на основе управления рисками технико-экономической защищенности конструкций и сооружений промышленных объектов.

Таким образом, проблема обеспечения технологической безопасности конструкций и сооружений промышленных объектов сводится к следующим аспектам:

- создания единой системы требований технико-экономической защищенности стальных конструкций в условиях коррозионных воздействий;
- формирования нормативно-технических положений конструктивной безопасности в части коррозионно-механического разрушения металлических конструкций;
- определения принципов зонирования и дифференциации определяющих параметров коррозионного состояния по уровню надежности конструкций и сооружений;
- выявления характера угроз и оценка уязвимости по данным мониторинга коррозионного состояния конструкций;
- разработки методов, критериев и процедуры выполнения риск-диагностики корродирующих конструкций для выявления остаточного ресурса;
- обоснования обобщенной структурной модели работоспособности для продления ресурса по уровню надежности в условиях коррозионной опасности;
- построения баз данных технико-экономической защищенности конструкций и сооружений промышленных объектов;
- разработки программ повышения квалификации специалистов в области обеспечения технологической безопасности промышленных объектов в основных отраслях экономики.

Постановка задач и практическая реализация стратегии технологической безопасности промышленных объектов отражает результаты работ Донбасского центра технологической безопасности (ДонЦТБ, г. Макеевка) ООО «Украинский институт стальных конструкций им. В.Н. Шимановского» [9]. Оработка научно-методического сопровождения проблемы ресурса корродирующих металлических конструкций выполнена на более чем 500 объектах горнорудной, угольной, металлургической, машиностроительной, химической промышленности, инфраструктуры транспорта и связи Донбасса [10], [11].

Стратегия технологической безопасности

Поиск методологической платформы предотвращения коррозионной опасности промышленных объектов диктуется необходимостью развития требований конструктивной безопасности на основе оценки риска аварии [12], [13]. Вместе с этим защищенность строительных объектов, наряду с требованиями конструктивной безопасности (пассивного барьера), определяется мерами технологической безопасности (активного барьера) [14]. Активируемые барьеры устанавливаются на основе принципов *DMAIC* (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*), позволяющих выполнять мониторинг и риск-диагностику технического состояния конструкций. Управление технологической безопасностью включает обоснование, планирование, обеспечение, повышение и поддержание эксплуатационных

параметров конструкций и сооружений, влияющих на выполнение производственной программы и качество продукции.

Стратегия мер технологической безопасности основана на пяти принципах *DMAIC* и включает:

- принятие на себя рисков мониторинга эксплуатационных параметров, технического обслуживания по фактическому состоянию конструкций и сооружений.
- перераспределения ответственности путем выполнения риск-диагностики с привлечением экспертных (специализированных) организаций.

Как следует из вышеизложенного, конструктивная безопасность регламентируется условиями надежности и живучести установленными при проектировании. В свою очередь, управление технологической безопасностью включает предотвращение коррозионной опасности с учетом приемлемого риска дополнительных мер технико-экономической защищенности. По сути понятия, технологическая безопасность представляет важную структурную составляющую безопасности предприятия, характеризующую систему мер для поддержания работоспособности, повышения эксплуатационных свойств конструкций и сооружений. Как правило, требования технологической безопасности реализуются по отношению к промышленным объектам, которые полностью или в значительной степени исчерпали свой нормативный ресурс и являются источником потенциальной опасности для функционирования, модернизации, реконструкции и продления срока эксплуатации [15].

Пренебрежение к нарушениям режима нормальной эксплуатации обуславливают изменения интенсивности воздействий агрессивных сред, необходимость корректировки расчетных моделей и расчетных ситуаций по признакам коррозионной опасности. Результатом игнорирования физико-химической природы коррозионного разрушения являются аварийные обрушения конструкций и сооружений, вызывающие чрезвычайные ситуации на промышленных объектах (рис. 1).

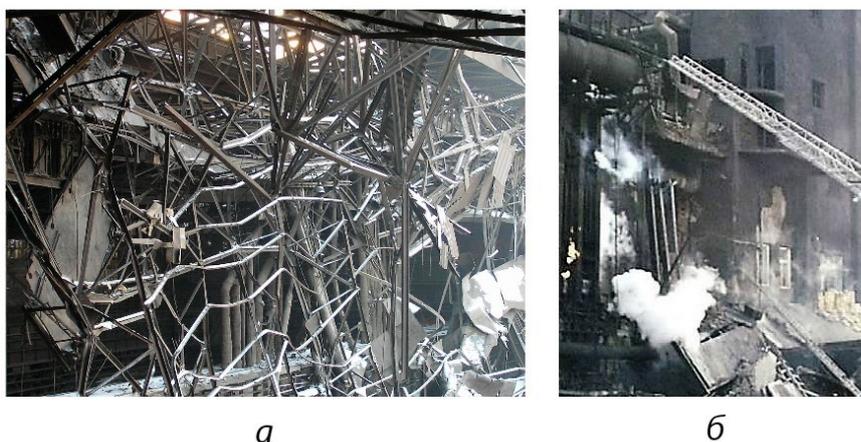


Рисунок 1 - Последствия аварий, сопровождающие коррозионные повреждения конструкций и сооружений
DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2023.41.2.1>

Примечание: а - прогрессирующее разрушение конструкций покрытия; б - разрушение коксовой батареи при взрыве, вызванном утечкой газа в трубопроводе

Стратегия программно-целевого управления технологической безопасностью в условиях коррозионной опасности основана на выборе заказчиком (собственником) приемлемого цикла развития технико-экономической защищенности промышленных объектов [8]. Составляющие механизма управления технологической безопасностью представлены на рис. 2.



Рисунок 2 - Стратегия программно-целевого развития циклов коррозионной защищенности
DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2023.41.2.2>

Циклы развития средств и методов защиты от коррозии позволяют формировать требования к мерам технического обслуживания с учетом качественных условий антикризисного (цикл Q1), затратного (цикл Q2), стимулирующего (цикл Q3) или сбалансированного (цикл Q4) технико-экономической защищенности конструкций и сооружений.

Регулирование мер предотвращения коррозионной опасности производится на основании оценки степени риска (R_i , балл) технологической безопасности в зависимости от уровня надежности средств защиты, значимости угрозы и категории уязвимости объектов (табл. 1).

Использование мер анализа уровня надежности по признакам коррозионной опасности (KI-KV), согласно процедуре HAZOP и норм менеджмента рисков IEC/ISO 31010, снижает влияние «человеческого фактора» и позволяет принимать решения по регулированию коррозионной защищенности (ZI-ZIV) исходя из приемлемых вариантов защиты.

Таблица 1 - Степень риска технологической безопасности
DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2023.41.2.3>

Уровень надежности средств защиты	Значимость угрозы (категория технического состояния)														
	Низкая (I)			Ограниченная (II)			Средняя (III)			Высокая (IV)			Предельная (V)		
	B	Б	A	B	Б	A	B	Б	A	B	Б	A	B	Б	A
ZI	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7
ZII	1	2	2	2	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7
ZII I	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	6	6	7	7	7
ZI V	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
KII I	3	4	4	4	5	5	6	6	7	7	7	8	8	9	9
KI V	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

Системный анализ конструктивной безопасности

В государственных программах на 1981 – 1985 годы и на период до 1990 года значительное внимание уделялось вопросам повышения долговечности и износостойкости, выявлению остаточной несущей способности и пригодности конструкций и сооружений к дальнейшей эксплуатации, выполнению мер по обеспечению расчетного срока службы в процессе реконструкции или восстановления зданий и сооружений предприятий черной металлургии, а также зданий и сооружений ведущих отраслей экономики (машиностроение, энергетика и др.) [2]. Благодаря концентрации усилий при решении отраслевой научно-технической проблемы 0.55.16.101 «Разработать и внедрить эффективные методы и средства антикоррозионной защиты строительных конструкций» была выполнена систематизация экспериментальных данных исследований: степени агрессивности воздействий, коррозионной стойкости конструкций и их защитных покрытий, эффективности новых материалов и технологий защиты от коррозии. Кроме разработки новых норм СНиП 2.03.11-85, вопросы контроля коррозионного состояния и восстановления защиты от коррозии нашли отражение в Пособии [9], подготовленном ЦНИИПроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова.

Важность создания долговечных и экономичных конструкций, способных длительное время сохранять работоспособность при установленных физико-химических воздействиях, обоснована в работах ведущих научных школ в области металлостроительства [16].

Предотвращение коррозионной опасности промышленных объектов выдвигает на первый план определение угроз и источников агрессивных воздействий, а также выявления видов коррозионных повреждений. Вместе с этим принципиальным вопросом определения конструктивной безопасности является оценка степени коррозионного повреждения, характеризующая утрату первоначальных технико-эксплуатационных свойств (прочности, устойчивости, надежности и пр.) в результате влияния природно-техногенных факторов. К сожалению, рекомендации Пособия [9] не раскрывают процедуру управления надежностью корродирующих конструкций с учетом положений метода предельных состояний.

Как известно, основные требования EN 1990 по обеспечению качества и надежности конструкций предусматривают выполнение расчета с использованием частных коэффициентов безопасности, представленных в EN 1990, и сочетаний нагрузок EN 1991. Обеспечение конструктивной безопасности осуществляется по правилам, установленным в EN 1993. Таким образом, управление надежностью и безопасностью достигается путем задания расчетных требований и соответствующих методов технического обслуживания конструкций и сооружений.

Совершенствование принципов оценки конструктивной безопасности предлагается выполнять на основе системного анализа эксплуатационных показателей мониторинга и риск-диагностики стальных конструкций с учетом целеполагающих ориентиров приемлемых затрат и издержек в условиях коррозионной опасности (рис. 3).

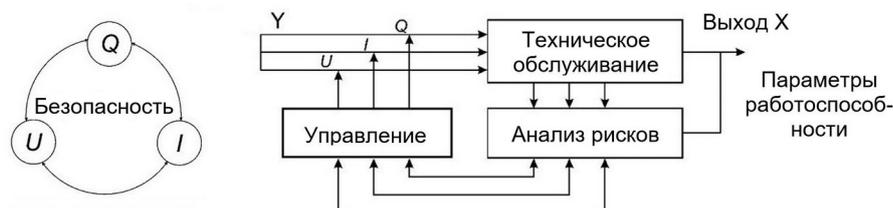


Рисунок 3 - Схема управления технологической безопасностью объектов
DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2023.41.2.4>

Область применения методов оценки риска предусматривает контроль определительных параметров коррозионного состояния (ОПКС), которые могут изменяться в течение продолжительного времени. ОПКС включают показатели коррозионной опасности, подлежащие контролю в соответствии с задачами оценки конструктивной безопасности (табл. 2, 3).

Таблица 2 - Определительные параметры коррозионного состояния

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2023.41.2.5>

Шкала стойкости металлов и покрытий				Категория ответственности конструкции	Коэффициенты надежности	
Группа стойкости по ГОСТ 13819	Оценка стойкости, балл	Глубина поражения, мм/год	Класс первичной и вторичной защиты по СП 28.1330.2017		Первичной защиты, $g_{зк}$	Вторичной защиты, g_{zn}
Нестойкие (IV)	8 7	1–5 0,5–1	I	C4	От 0,80 до 0,85	От 0,85 до 0,90
Пониженно	6	0,1–0,5	II	C3	» 0,85	» 0,90

-стойкие (III)	5	0,05–0,1			» 0,90	» 0,95
Удовлетворительно стойкие (II)	4	0,01–0,05	III	C2	» 0,90	» 0,95
	3	0,005–0,01			» 0,95	» 0,99
Стойкие (I)	2	0,001–0,005	IV	C1	» 0,95	» 0,99
	1	Менее 0,001			» 0,99	» 1,00

Таким образом, сбор и систематизация данных, характеризующих изменчивость агрессивных воздействий, свойств материалов и условий работы конструкций и сооружений, для управления технологической безопасностью (см. рис. 3), позволяет использовать методические подходы и требования управления надежностью EN 1990, EN 1991 и EN 1993.

Таблица 3 - Частные коэффициенты предельных состояний по коррозионной опасности

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2023.41.2.6>

Основные переменные коррозионной опасности	Частные коэффициенты надежности			
	Условия EN 1990		Условия выявления коррозионной опасности	
	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Воздействия	Коэффициент надежности по воздействиям	g_f	Коэффициент надежности по агрессивным воздействиям	g_{fk}
Материалы, покрытия	Коэффициент надежности свойств материала	g_m	Коэффициент надежности по коррозионной стойкости материала	g_{mk}
			Коэффициенты надежности первичной защиты	g_{zk}
			Коэффициенты надежности вторичной защиты	g_{zn}
Эффекты воздействий	Коэффициент учета эффекта воздействий	g_{sd}	Коэффициент коррозионного состояния	g_{zf}

Системные задачи мониторинга и риск-диагностики конструктивной безопасности рассматриваются на основе зонирования факторов коррозионных воздействий и формирования однородных групп конструктивных элементов по параметрам средств защиты [8]. При этом формирование выборок данных коррозионно-механического разрушения для оценивания частных коэффициентов производится по объектно-функциональным признакам конструкций и сооружений с помощью расчетных зависимостей основных моделей ОПКС (табл. 4).

Статистический контроль эксплуатационных характеристик конструкций и сооружений обеспечивает фиксацию пространственно-временных интервалов коррозионной опасности промышленных объектов, обоснование превентивных мер по рекомендациям квалитметричного мониторинга (протокол службы технической эксплуатации объекта) и риск-диагностики корродирующих конструкций (заключение экспертной организации).

На этапе мониторинга выполняется фрагментация уровня коррозионной опасности по данным анализа эксплуатационных характеристик конструкций и сооружений.

Таблица 4 - Модели ОПКС для формирования выборок данных коррозионного разрушения
DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2023.41.2.7>

№№	Характеристика ОПКС	Расчетная зависимость
ОП1	Равномерный коррозионный износ i -того элемента по данным j -того измерения $(\Delta t)_j^i$	$(\Delta t)_j^i = (\Delta t_0)_j + Up_j \cdot S\Delta t$
ОП2	Среднее значение коррозионного поражения $(\Delta t_0)_j^i$	$(\Delta t_0)_j^i = t_j - t_{kj}^i$
ОП3	Глубина коррозионных язв или питтингов (ΔP)	$(\Delta P)^i = (\Delta P_0)_j + Up_j \cdot S\Delta p$
ОП4	Коэффициент плотности коррозионных поражений (γ_p)	$\gamma_p = \frac{F_k}{F}$
ОП5	Коэффициент коррозионного состояния на момент обследования $(\gamma_{\text{эф}})$	$\gamma_{\text{эф}} = \alpha_k \alpha_p \gamma_k (1 - \delta)$
ОП6	Коэффициент изменения геометрических характеристик сечений с учетом равномерной коррозии (α_k)	$\alpha_k = \frac{\Omega_{k,j}}{\Omega}$
ОП7	Коэффициент изменения геометрических характеристик сечений с учетом местной коррозии (α_p)	$\alpha_p = 1 - 2\gamma_p \frac{(\Delta P)_j^o}{t_{kj}^o}$
ОП8	Коэффициент изменения расчетного сопротивления при сжатии, растяжении или изгибе (γ_k)	$\gamma_k = \frac{R_{yk}}{R_y}$

Уровни коррозионной опасности (KI-KV) устанавливают интегральные интервалы изменения степени агрессивности воздействий $A(L, G, S)$ и коэффициента готовности K_g обобщенной матрицы надежности средств защиты от коррозии. В качестве примера зонирования коррозионных воздействий на рис. 4 представлены мониторинговые показатели, полученные на объектах коксохимического производства.

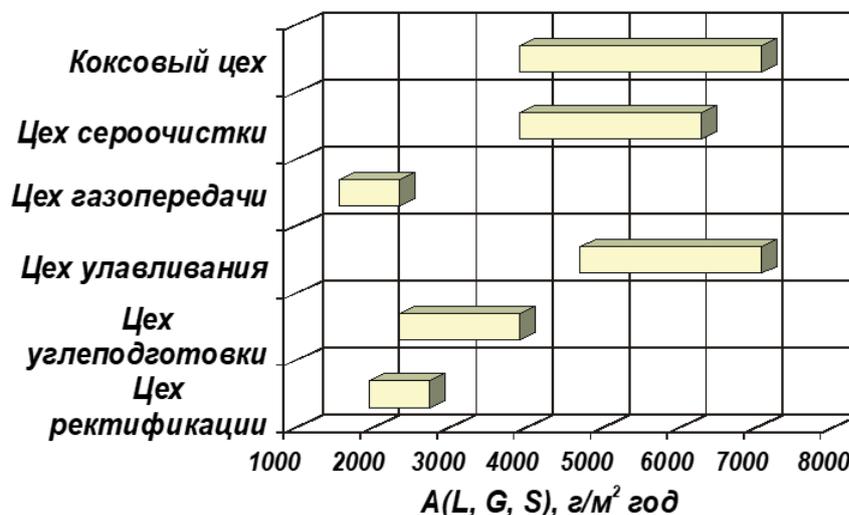


Рисунок 4 - Результаты оценки интенсивности коррозионных воздействий
DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2023.41.2.8>

На этапе риск-диагностики реализуются преимущества, связанные с корректировкой или последовательным переходом от проектных расчетных ситуаций к сценарным вариантам управления технико-экономической защищенностью промышленных объектов. При этом задача предотвращения коррозионной опасности, с учетом предельного уровня затрат и издержек C_{lim} , решается на основе сбалансированной системы индексов, определяющих статистические показатели эффективности мер защиты от коррозии (рис. 5).

Сочетание системного анализа угроз прогрессирующего развития ОПКС и возможностей процессного управления регламентными требованиями ПОН позволяет регулировать риски технологической безопасности конструкций и сооружений.

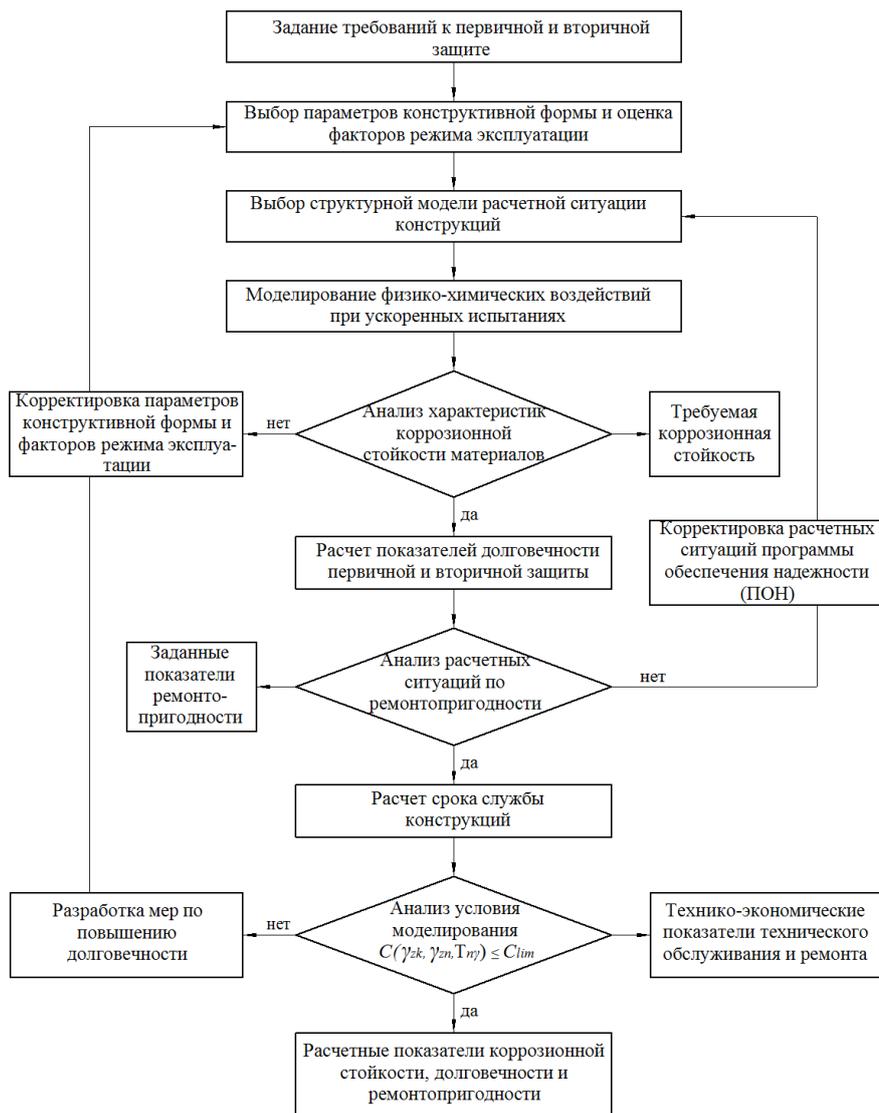


Рисунок 5 - Блок-схема алгоритма назначения ресурса (T_{ny} , год) по заданным условиям технического обслуживания
 DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2023.41.2.9>

Технико-экономические регуляторы безопасности

Реализация этапов программно-целевого развития, в соответствии с заданными технико-экономическими критериями технологической безопасности, соответствует методам управления качеством и надежностью на основе ИСО 9001 (рис. 6).



Рисунок 6 - Процессный подход к предотвращению коррозионной опасности при эксплуатации промышленных объектов

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2023.41.2.10>

Наибольший интерес риск-ориентированное управление технологической безопасностью представляет для вертикально-интегрированных компаний, обладающих разветвленной объектно-функциональной структурой [17]. Регулирование технико-экономических рисков на основе стратегии технологической безопасности промышленных предприятий позволяет сосредоточить предупредительные меры противодействия и концентрировать требуемые ресурсы на проблемных конструкциях и сооружениях с высоким уровнем коррозионной опасности.

Экономический ущерб предприятию в связи с коррозионным разрушением основных фондов включает следующие слагаемые:

- потери прибыли вследствие недополучения продукции при внеплановых простоях оборудования;
- дополнительные расходы на проведение текущих и капитальных ремонтов, вызванные сокращением межремонтных периодов и увеличением трудоемкости и материалоемкости;
- потери предприятия от недоамортизации зданий и сооружений в связи с сокращением сроков их службы;
- сопутствующие дополнительные расходы, обусловленные предупреждением повышенного износа основных фондов или компенсацией возникающих при этом затрат на противокоррозионную защиту.

В советский период объективный анализ экономической эффективности средств защиты по отраслям экономики выполнялся путем учета потерь от коррозии и затрат на противокоррозионную защиту по форме статистической отчетности № 1-кор. Условия рыночной экономики диктуют необходимость использования интегральных критериев (индексов) на основе методов риск-анализа циклов развития технико-экономической защищенности промышленных объектов.

Функционирование организационно-экономического механизма предотвращения коррозионной опасности зависит от признаков рискпонижающих моделей, реализуемых при технической эксплуатации конструкций и сооружений:

- модель антикризисного управления отражает состояние деградации и разрушения промышленных объектов;
- модель затратного инерционного развития характеризует отсутствие экономических условий стимулирования и роста показателей эффективности функционирования предприятий, отсутствие инновационных проектов и программ развития, сдерживание модернизации и технологического обновления основных фондов;
- стимулирующая модель приобретает значение при частичном отказе от ограничений инерционного развития и необходимости реализации конкурентного потенциала;
- модель инновационно-инвестиционного развития находит применение для преобразования инновационных факторов в основной источник экономического роста.

Рассмотрение технико-экономических факторов сценарных вариантов [17] по циклам развития средств защиты (см. рис. 2) предлагается выполнять с учетом индекса предотвращения коррозии (ИПК) в виде:

$$\text{ИПК} = \text{КСПК} / \text{ЗСЗК} \quad (1)$$

где КСПК – компенсационная составляющая потерь от коррозии, р.;

ЗСЗК – затраты системы защиты от коррозии, р.

Показатель ЗСЗК учитывает вариабельность затрат на меры первичной (ССПЗ) и вторичной (ССВЗ) защиты:

$$\text{ЗСЗК} = \text{ССПЗ} + \text{ССВЗ} \quad (2)$$

где СППЗ – стоимость средств первичной защиты, р.;

ССВЗ – стоимость средств вторичной защиты, р.

Норма доходности (НД) инноваций циклов развития средств защиты имеет вид:

$$\text{НД} = (\text{КСПК} - \text{ЗСЗК}) / \text{ЗСЗК} = \text{ЭЭСЗ} / \text{ЗСЗК} \quad (3)$$

где ЭЭСЗ – экономическая эффективность средств защиты, р.

Показатель интегральной эффективности (ИЭ, р/м²год) определяется на основе зависимости:

$$\text{ИЭ} = \text{КСПК} / \text{ППП} \times \text{СЗК} \quad (4)$$

где РПП – развернутая площадь поверхности, м²;

СЗК – срок защиты от коррозии, год.

Следует отметить, что компенсационная составляющая коррозионных потерь (КСПК, р.) рассчитывается по средней закупочной стоимости металлолома на момент выполнения мониторинга коррозионной опасности, согласно установленным данным о степени агрессивности воздействий (см. рис. 4) и развернутой поверхностью конструкций. Таким образом, индексные технико-экономические регуляторы (ИПК, НД, ИЭ) обеспечивают сравнительный анализ сценарных вариантов технико-экономической защищенности независимо от рыночных колебаний стоимости материалов и услуг по защите от коррозии конструкций и сооружений. Применение сбалансированной системы индексов технико-экономической защищенности отражает принципы «бережливого хозяйствования» концепции *Lean Six Sigma*.

Закключение

Эффективность выявления, анализа и предупреждения коррозионной опасности на основе мер конструктивной и технологической безопасности может быть обеспечена при реализации программно-целевого подхода к управлению с учетом приемлемых рисков. Разумные компромиссы, связанные с проявлением негативных факторов (убытками) и возможностями циклов развития средств защиты от коррозии, определяются на производственных объектах путем обоснования данных технико-экономической защищенности конструкций и сооружений.

Проблемы и трудности, сопровождающие коррозионное разрушение стальных конструкций, диктуют необходимость дифференциации уровней надежности противокоррозионной защиты. В значительной степени угрозы аварийных ситуаций, утрата работоспособности конструкций вызваны неопределенностью параметров технического состояния, отсутствием регламентных процедур и расчетных моделей оценки коррозионной опасности по критериям предельных состояний.

Знания и осведомленность в области коррозии и противокоррозионной защиты необходимо трансформировать, принимая во внимание современные практики регулирования надежности и предупреждения техногенных рисков. Основные положения и требования контроля и восстановления эксплуатационных параметров работоспособности Пособия [9] следует привести в соответствие с критериями методики оценки предельных состояний [18]. Кроме формализации нормативно-методического сопровождения вопросов мониторинга и риск-диагностики корродирующих конструкций, требуется существенно улучшить деятельность служб менеджмента при постановке и регламентации задач программно-целевого развития на протяжении жизненного цикла производственных объектов.

Политика руководства в области постоянного улучшения качества и безопасности, декларирование уровней ответственности, вовлечение эксплуатационного персонала в процессы предотвращения рисков коррозионного разрушения конструкций являются неотъемлемыми элементами стратегии обеспечения технологической безопасности (см. рис. 6). Удовлетворенность собственника показателями превентивного управления связана с достижением заявленных целей технического обслуживания конструкций и сооружений при минимизации рисков технико-экономической защищенности. Важная роль в интеграции положений конструктивной и технологической безопасности принадлежит цифровизации знаний и повышению квалификации персонала, задействованного по направлениям предотвращения аварийных ситуаций промышленных объектов.

Положения нормирования уровня надёжности нашли отражение при разработке стандарта по защите от коррозии металлических конструкций [19]. Разработанная стратегия получила опыт применения на объектах ПАО «Донецксталь»-металлургический завод», ПАО «Металлургический комбинат «Азовсталь» (г. Мариуполь) в 2008-2015 гг. [15].

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Cost of Corrosion. — URL: [https:// membership.corrosion.com.au/blog/ cost-of-corrosion-part-one/](https://membership.corrosion.com.au/blog/cost-of-corrosion-part-one/) (accessed: 20.03.2022).
2. Горохов Е.В. Долговечность стальных конструкций в условиях реконструкции / Е.В. Горохов и др. — М.: Стройиздат, 1994. — 488 с.
3. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / А.В. Перельмутер. — М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2007. — 256 с.
4. Шимановский А.В. Техническая диагностика и предупреждение аварийных ситуаций конструкций зданий и сооружений / А.В. Шимановский [и др.] — К.: Сталь, 2008. — 463 с.
5. Мельчаков А.П. Конструкционная безопасность зданий и сооружений. Теория и технологии обеспечения / А.П. Мельчаков. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. — 181 с.
6. Тамразян А.Г. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера / А.Г. Тамразян, С.Н. Булгаков [и др.] — М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2012. — 304 с.
7. Safety Assessment of Existing Buildings and Structures / Ed. by K.I. Eremin, V.D. Raizer, V.I. Telichenko. — Magnitogorsk: WELD, 2014. — 265 p.

8. Королёв В.П. Эволюция концептуальных подходов к управлению коррозионной защищенностью стальных конструкций и сооружений / В.П. Королёв, А.А. Рыженков, П.В. Королёв // Промышленное и гражданское строительство. — 2022. — № 8. — С. 32-40. — DOI: 10.33622/0869-7019.2022.08.32-40.
9. 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) / ЦНИИ проектстальконструкции им. Мельникова. — М.: Стройиздат, 1989. — 51 с.
10. Российская Федерация. Законы. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений (ред. от 02.07.2013): федер. закон: [от 30 декабря 2009 г.]. — № 384-ФЗ.
11. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» / Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору // Декларирование промышленной безопасности и оценка риска. — М.: Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности, 2016. — Вып. 16. — 56 с.
12. Исаков Ш.Ш. Оценка надёжности эксплуатации зданий и сооружений по методикам возникновения риска их неработоспособных состояний / Ш.Ш. Исаков Ф.Е. Ковалев, В.М. Васкевич [и др.] // Инженерно-строительный журнал. — 2012. — № 7(33). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-nadyozhnosti-ekspluatatsii-zdaniy-i-sooruzheniy-po-metodikam-vozniknoveniya-riska-ih-nerabotosposobnyh-sostoyaniy> (дата обращения: 26.08.2023).
13. Байбурин А.Х. Техническое регулирование безопасности зданий и сооружений на основе оценки риска аварии / А.Х. Байбурин, А.П. Мельников // Архитектура, градостроительство и дизайн. — 2016. — № 11. — С. 3-10.
14. Королёв В.П. Квалиметрические методы управления рисками технологической безопасности конструкций и сооружений промышленных объектов / В.П. Королёв // Безопасность жизнедеятельности. — 2021. — № 8. — С. 29-40.
15. Волошин В.С. Технологічна безпека та забезпечення якості протикорозійного захисту промислових об'єктів: регіональні аспекти / В.С. Волошин, В.П. Корольов, Ю.В. Філатов // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія Технічні науки. — 2013. — Вип. 26. — С. 235-240.
16. Мельников Н.П. Металлические конструкции: современное состояние и перспективы развития / Н.П. Мельников. — М.: Стройиздат, 1983. — 543 с.
17. Корольов П.В. Концептуальні положення ризик-орієнтованого управління оновленням стану основних засобів промислових підприємств / П.В. Корольов // Проблеми та перспективи забезпечення стабільного соціально-економічного розвитку: збірник наукових праць Донецького державного університету управління. Серія «Економіка». — Маріуполь: ДонДУУ, 2017. — Т. XVIII. — Вип. 304. — С. 286-297.
18. Королёв В.П. Нормативное регулирование надежности и безопасности систем противокоррозионной защиты металлоконструкций / В.П. Королёв, И.В. Куценко // Промышленное и гражданское строительство. — 2016. — № 1. — С. 37-42.
19. Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги до проектування: ДСТУ Б В.2.6-193:2013. — К.: Мінрегіон України, 2013. — 74 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Cost of Corrosion. — URL: <https://membership.corrosion.com.au/blog/cost-of-corrosion-part-one/> (accessed: 20.03.2022).
2. Gorohov E.V. Dolgovechnost' stal'nykh konstruktsiy v usloviyakh rekonstruktsii [Durability of Steel Structures Under Reconstruction] / E.V. Gorohov [et al.] — М.: Strojizdat, 1994. — 488 p. [in Russian]
3. Perel'muter A.V. Izbrannyye problemy nadezhnosti i bezopasnosti stroitel'nykh konstruktsiy [Selected Reliability and Safety Issues of Building Structures] / A.V. Perel'muter. — М.: ACU Publishing House, 2007. — 256 p. [in Russian]
4. Shimanovskiy A.V. Tehnicheskaya diagnostika i preduprezhdenie avariynykh situatsiy konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy [Technical Diagnostics and Prevention of Accident Cases for Buildings and Installations] / A.V. Shimanovskiy [et al.] — К.: Stal', 2008. — 463 p. [in Russian]
5. Mel'chakov A.P. Konstrukcionnaya bezopasnost' zdaniy i sooruzheniy. Teoriya i tehnologii obespecheniya [Structural Safety of Buildings and Installations. Safety Theory and Technology] / A.P. Mel'chakov. — Chelyabinsk: SUSU Publishing House, 2011. — 181 p. [in Russian]
6. Tamrazjan A.G. Snizhenie riskov v stroitel'stve pri chrezvychajnykh situatsiyah prirodnoho i tehnogennogo haraktera [Decrease of Risks in Building at Emergency Situations of Natural and Technogenic Character] / A.G. Tamrazjan, S.N. Bulgakov [et al.] — М.: ACU Publishing House, 2012. — 304 p. [in Russian]
7. Safety Assessment of Existing Buildings and Structures / Ed. by K.I. Eremin, V.D. Raizer, V.I. Telichenko. — Magnitogorsk: WELD, 2014. — 265 p.
8. Koroljov V.P. Jevoljucija konceptual'nykh podhodov k upravleniju korrozionnoj zashchishhennost'ju stal'nykh konstruktsiy i sooruzhenij [Evolution of Conceptual Approaches of Management of Corrosion Protection of Steel Structures and Facilities] / V.P. Koroljov, A.A. Ryzhenkov, P.V. Koroljov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. — 2022. — № 8. — P. 32-40. — DOI: 10.33622/0869-7019.2022.08.32-40. [in Russian]
9. Posobie po kontrolju sostojaniya stroitel'nykh metallicheskih konstruktsiy zdaniy i sooruzhenij v agressivnykh sredah, provedeniju obsledovanij i proektirovaniyu vosstanovleniya zashchity konstruktsiy ot korrozii (k SNiP 2.03.11-85) [Manual on Monitoring of State of Structural Steel of Buildings and Installations in Corrosive Environments, Surveying and Design of Renewal of Structure Corrosion Protection (to SNiP 2.03.11-85)] / Central Research Institute of Design and Construction named after Melnikov. — М.: Strojizdat, 1989. — 51 p. [in Russian]
10. Rossijskaja Federacija. Zakony. Tehnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij (red. ot 02.07.2013) [Technical Regulations on Safety of Buildings and Structures (with alterations as of July 2, 2013)]: Federal Law: [December 30, 2009]. — № 384-FL. [in Russian]

11. Rukovodstvo po bezopasnosti «Metodicheskie osnovy po provedeniju analiza opasnostej i ocenki riska avarij na opasnyh proizvodstvennyh objektah» [Safety Guide “Methodological Basis for Conducting Hazard Analysis and Assessing the Risk of Accidents at Hazardous Production Facilities”] / Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision // Deklarirovanie promyshlennoj bezopasnosti i ocenka riska [Declaration of Industrial Safety and Risk Assessment]. — M.: Scientific and Technical Center for Research on Industrial Safety Problems, 2016. — Iss. 16. — 56 p. [in Russian]
12. Ishakov Sh.Sh. Ocenka nadozhnosti jekspluatatsii zdaniy i sooruzhenij po metodikam vozniknoveniya riska ih nerabotosposobnyh sostojanij [Assessing the Reliability of Operation of Buildings and Structures Using Methods for the Risk of Their Inoperable Conditions] / Sh.Sh. Ishakov F.E. Kovalev, V.M. Vaskevich [et al.] // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal [Magazine of Civil Engineering]. — 2012. — № 7(33). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-nadyozhnosti-ekspluatatsii-zdaniy-i-sooruzheniy-po-metodikam-vozniknoveniya-riska-ih-nerabotosposobnyh-sostoyaniy> (accessed: 26.08.2023). [in Russian]
13. Bajburin A.H. Tehnicheskoe regulirovanie bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij na osnove ocenki riska avarii [Technical Regulation of Security of Buildings and Facilities on the Basis of Risk Assessment of Accident] / A.H. Bajburin, A.P. Mel'chakov // Arhitektura, gradostroitel'stvo i dizajn [Architecture, Urbanism and Design]. — 2016. — № 11. — P. 3-10. [in Russian]
14. Korol'ov V.P. Kvalimetricheskie metody upravlenija riskami tehnologicheskoy bezopasnosti konstrukcij i sooruzhenij promyshlennyh objektov [Qualimetric Methods of Managing Risks of the Process Safety of Structures and Installations of Industrial Facilities] / V.P. Korol'ov // Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti [Life Safety]. — 2021. — № 8. — P. 29-40. [in Russian]
15. Voloshin V.S. Tehnologichna bezpeka ta zabezpechennja jakosti protikoroziynogo zahistu promislovih ob'ektiv: regional'ni aspekti [Technological Safety and Corrosion Protection Quality Assurance: Regional Aspects] / V.S. Voloshin, V.P. Korol'ov, Ju.V. Filatov // Visnik Priazov'skogo derzhavnogo tehničnogo universitetu. Serija Tehnični nauki [Bulletin of the Azov State Technical University. Technical Science Series]. — 2013. — Iss. 26. — P. 235-240. [in Ukrainian]
16. Mel'nikov N.P. Metallicheskie konstrukcii: sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija [Metal Structures: Current State and Development Prospects] / N.P. Mel'nikov. — M.: Strojizdat, 1983. — 543 p. [in Russian]
17. Korol'ov P.V. Konceptual'ni polozhennja rizik-orientovanogo upravlinnja onovlennjam stanu osnovnih zasobiv promislovih pidpriemstv [Conceptual Provisions of Risk-oriented Management of Updating the State of Fixed Assets of Industrial Enterprises] / P.V. Korol'ov // Problemi ta perspektivi zabezpechennja stabil'nogo social'no-ekonomichnogo rozvitku: zbirnik naukovih prac' Donec'kogo derzhavnogo universitetu upravlinnja. Serija «Ekonomika» [Problems and Prospects of Ensuring Stable Social and Economic Development: collection of scientific works. «Economy» series]. — Mariupol': DonDUU, 2017. — Vol. XVIII. — Iss. 304. — P. 286-297. [in Ukrainian]
18. Korol'ov V.P. Normativnoe regulirovanie nadezhnosti i bezopasnosti sistem protivokorroziynnoj zashhity metallokonstrukcij [Regulatory Control of Reliability and Safety of Structural Steel Corrosion Protection System] / V.P. Korol'ov, I.V. Kushhenko // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. — 2016. — № 1. — P. 37-42. [in Russian]
19. Zahist metalevih konstrukcij vid korozii. Vimogi do proektuvannja [Protecting Structures from Corrosion. Requirements to design works]: DSTU B V.2.6-193:2013. — K.: Ukraine Minregion, 2013. — 74 p. [in Ukrainian]