

**УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ КОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИЩЕННОСТИ ПРИ РЕШЕНИИ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ЗАДАЧ ЖИВУЧЕСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Королёв П.В.,**  
*ПСГ «Интострой», Одесса*

**Королёв В.П.,** д.т.н., проф.,  
**Кущенко И.В.**  
*ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Мариуполь*  
center\_sts@ukr.net

**Аннотация.** Изложен методический подход к управлению технологической безопасностью конструкций и сооружений по уровню коррозионной опасности. Сформирована логистическая система резервирования живучести конструкций на основе признаков коррозионной опасности промышленных объектов. Установлен индекс уровня коррозионной защищенности для управления технологической безопасностью на основе снижения рисков.

**Ключевые слова:** надежность, конструктивная и технологическая безопасность, готовность, живучесть, коррозионная опасность, оценка рисков.

**УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ КОРОЗІЙНОЇ ЗАХИЩЕНОСТІ ПРИ ВИРІШЕННІ ПРЯМОЇ ТА ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧ ЖИВУЧОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

**Корольов П.В.,**  
*ПБГ «Интобуд», Одеса*

**Корольов В.П.,** д.т.н., проф.,  
**Кущенко И.В.,**  
*ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Маріуполь*  
center\_sts@ukr.net

**Анотація.** Викладено методичний підхід до управління технологічною безпекою конструкцій та споруд за рівнем корозійної небезпеки. Сформована логістична система резервування живучості конструкцій за ознаками корозійної небезпеки промислових об'єктів. Встановлено індекс рівня корозійної захищеності для управління технологічною безпекою на основі зниження ризиків.

**Ключові слова:** надійність, конструктивна та технологічна безпека, готовність, живучість, корозійна небезпека, оцінка ризиків.

**CORROSION PROTECTION RISK MANAGEMENT IN SOLVING THE DIRECT AND INVERSE PROBLEMS OF STRUCTURAL STEEL SURVIVABILITY**

**Korolov P.V.,**  
*PSG "Intosroy", Odessa*

**Korolov V.P.,** D.Sc., Professor,  
**Kuschenko I.V.,**  
*State Higher School «Priazovsky State Technical University», Mariupol,*  
center\_sts@ukr.net

**Abstract.** Methodological approach has been developed to managing technological safety of structures and installations based on a level of an industrial facility corrosion hazard. Logistical system has been generated for structural survivability reserve planning on the basis of signs of corrosion hazard.

The developed methodology involves an analytical-experimental estimate of reliability and availability factors of corrosion protection. Reliability factors of primary and secondary protection take into account uncertainty of design models of a facility's corrosion hazard. Availability factor of structural steel is a complex index of reparability that characterizes parameters of structural and technological measures of primary and secondary protection. The index of a level of corrosion protection is specified for managing technological safety on the basis of risk reduction.

**Keywords:** reliability, structural and technological safety, availability, survivability, corrosion hazard, risk assessment.

**Постановка проблемы.** В современных условиях хозяйствования и формирования рыночной экономики важное значение приобретает логистический менеджмент коррозионной защищенности конструкций и сооружений [1, 2]. Обоснование мер защиты от коррозии основных фондов имеет определяющее значение как фактор обеспечения устойчивого развития промышленных предприятий. Рассмотрим коррозионное разрушение как экономическую категорию, характеризующую старение основных фондов промышленного предприятия. В процессе эксплуатации зданий и сооружений каждое предприятие производит амортизационные отчисления в соответствии с размерами физического и морального износа. При этом коррозионное разрушение представляет компенсационную составляющую стоимости конструкции, перенесенную на продукцию в виде денежной суммы амортизации для возмещения ущерба. Такой подход позволяет рассматривать компенсационную составляющую коррозионных потерь (КСКП) как финансовые издержки, связанные с утратой показателей качества и долговечности конструкций и их защитных покрытий.

**Цель и задачи исследования.** Целью статьи является формирование единого методического подхода к оценке рисков коррозионной защищенности для обеспечения конструктивной и технологической безопасности промышленных объектов.

Формирование механизма экономического регулирования эффективности мер по защите от коррозии, в условиях ограниченных финансовых и материальных ресурсов, связано с заданием уровня коррозионной опасности конструкций и сооружений [3, 4]. Указанные обстоятельства имеют определяющее значение для обоснования комплексных критериев качества, надежности и безопасности системы 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. Предполагаемые возможности управления рисками должны обеспечивать последовательный переход или корректировку элементов ситуации 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. Создание системы менеджмента коррозионной защищенности направлено на управление рисками с использованием адаптационных и превентивных инструментов повышения эффективности работы предприятия.

Оценка рисков выполняется в соответствии с требованиями ISO/IEC 31010 на основе

метода HAZOP (Hazard and Operability Study), направленного на идентификацию угроз и возможностей запланированных мер поддержания работоспособного состояния СПЗК. Для обеспечения безопасности конструкций и сооружений большое значение имеет организационно-экономическая и производственно-технологическая деятельность основного производства. Поэтому поставки материалов и услуг в области защиты от коррозии – это сложная логистическая система с высоким уровнем ответственности каждого участника процесса, конечной целью которой является оптимизация затрат на поддержание работоспособности объекта в соответствии с установленными нормативными, технологическими и эксплуатационными требованиями.

Обоснованность мер ПОН, связанных с рациональным выбором СПЗК, зависит от степени полноты информации. Мотивационное обеспечение поведения субъекта экономической деятельности на стадии принятия решений включает SWOT – анализ. Таким образом, планирование мер ПОН заключается в выявлении конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов СПЗК по четырем классификационным категориям живучести: Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы).

По определению риск является функцией вероятности реализации угрозы, а также величины возможного ущерба. Принципиальной особенностью оценки рисков является взаимосвязь показателей качественных и количественных показателей. Вместе с этим, для структурирования входных данных при оценке рисков, необходим интегральный показатель, который определяет базисную основу анализа и принятия решений. На наш взгляд, таким комплексным критерием может служить индекс уровня риска коррозионной защищенности (УРКЗ):

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

где КСКП – компенсационная составляющая коррозионных потерь;

ЗСЗК – затраты на систему защиты от коррозии.

Индикаторы КСКП и ЗСЗК (в денежных единицах) рассчитывают на единую натуральную единицу измерения, характеризующую сравниваемые конструкции (шт., т, м<sup>3</sup>, м<sup>2</sup>, м). Индекс УРКЗ изменяется от нуля до единицы, выше которой риск не оправдан. Анализ УРКЗ позволяет производить нормирование его интервальных значений по группам объектов.

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 живучести конструкций.

**Нормативные требования обеспечения живучести.** Совершенствование норм проектирования, включая разработку основ, принципов и методов задания надежности, связано с решением проблем конструктивной и технологической безопасности [5, 6]. 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 впервые в нашей стране собственнику предоставлены дополнительные возможности для выбора приемлемой СПЗК. Вместе с этим, созданы условия для пересмотра требований [7] при оценке соответствия ОПКС объекта защиты признакам коррозионной опасности, установленным в табл. 1.

Значительным шагом вперед является внесение в ДБН В.2.6-198 изменений, допускающих меры первичной защиты (увеличение толщины проката) с учетом уровня коррозионной опасности.

Таблица 1 – Обобщенная матрица выбора уровня ПН 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

Установлены требования конструктивной приспособленности, препятствующие развитию местной, щелевой, контактной, межкристаллитной коррозии и коррозионному растрескиванию. Вместе с этим, при увеличении толщины металлопроката, оценку долговечности по мерам первичной защиты рекомендуется выполнять только при расчетном подтверждении соответствия с учетом положений ДСТУ-Н Б А.1.2-6. Таким образом, не учитывается изменение несущей способности в результате увеличения толщины конструктивных элементов по мерам первичной защиты, что объясняется, в первую очередь, отсутствием требований по мониторингу ОПКС конструкций.

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

$$K_g = \frac{T_{ky} + T_{zy}}{T_{ky} + nT_{zy}}; \quad (2)$$

где  $T_{ky}$  – срок службы (год) стальных конструкций по показателю коррозионной стойкости (первичная защита);

$T_{zy}$  – 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.

С точки зрения надежности, допустимое при заданной СПЗК снижение несущей способности элементов предлагается учитывать в расчетах по предельным состояниям с помощью фиктивных внешних нагрузок [8]. Конструктивная безопасность обеспечивается SWOT – анализом факторов СПЗК. Условие прямой задачи живучести при проектировании имеет вид: по заданным показателям матрицы уровня коррозионной защищенности стальных конструкций определить фиктивную коррозионную нагрузку ( $A_f$ ).

Обеспечение технологической безопасности в процессе эксплуатации связано с оценкой рисков коррозионного разрушения конструкций. Условие обратной задачи живучести формулируется следующим образом: по измеренным определительным параметрам коррозионного состояния выбрать модель продления ресурса стальных конструкций.

Интегральный показатель живучести ( $\eta$ ), характеризует снижение пропускной способности регулирования ресурса при деградации конструкций в процессе эксплуатации объекта:

$$\eta = 1 - 1/(\Gamma - \psi), \quad (3)$$

где  $\Gamma$  – отношение резерва надежности;

$\psi$  – коэффициент обратной связи режима эксплуатации конструкций.

Решение прямой и обратной задачи живучести связано с обоснованной оценкой ОПКС, что позволяет выполнять мониторинг признаков коррозионной опасности с использованием интегральных показателей (1 – 3).

**Мониторинг ОПКС.** Основными входными данными при идентификации угроз по методу НАЗОР 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 эксплуатационной несущей способности с целью принятия при необходимости мер по устранению негативных последствий.

Рассмотрим условия прямой задачи живучести на примере балочных стальных элементов рабочей площадки (табл. 2).

Таблица 2 – Постановка и решение прямой задачи живучести конструкций

№№ п/п	Характеристика условий задачи	Обозначение образцов – марка балки			
		Б-1	Б-2	Б-3	Б-4
1.	Определяющие параметры нормативных требований				
1.1.	Уровень коррозионной опасности	КП		КП	
1.2.	Характеристическое значение годовых коррозионных потерь ( $A_n$ ), г/м <sup>2</sup> год	1200			
1.3.	Коэффициент готовности ( $K_g$ )	0,10		0,22	
1.4.	Категория ответственности	С-2		С-4	
1.5.	Коэффициент надежности ( $\gamma_{zk}$ )	0,90		0,80	
2.	Алгоритм решения:				
2.1.	Фиктивная коррозионная нагрузка ( $A_f$ ): $m=7,85 \cdot 10^4$ - переводной коэффициент коррозионных потерь, г/см <sup>3</sup> ; $t$ – приведенная толщина сечения элемента, см.	$A_f = (1 - \gamma_{zk})mt$ ;			
		3140		6280	
2.2.	Сроки службы: конструкций ( $T_{ny}$ ) / первичной защиты ( $T_{kz}$ ); коэффициент кинетики коррозионного износа для стали С235с=0,78; коэффициент надежности по воздействиям $\gamma_{fk}=1,2$ .	$T_{zk} = \sqrt[3]{A_f / \gamma_{fk} A_n}$ ;			
		30/3,0		30/6,5	
2.3.	Отношение резерва надежности ( $\Gamma$ ):	$\Gamma = \Phi / N$ ;			
		1,24		1,4	
2.4.	Проектный индекс уровня риска коррозионной защищенности (УРКЗ):	Формула (1)			
		0,41		0,50	

Для экспериментальной проверки теоретических положений расчета строительных металлоконструкций по предельным состояниям I группы (на коррозионную стойкость) и II группы (на долговечность), проведены стендовые определительные испытания балочных элементов Z – образного сечения (далее по тексту – образцы), выполненных из холодногнутого тонколистового проката из стали С 235.

Программа эксперимента включала два последовательных этапа:

- на первом этапе (стендовые коррозионные испытания в промышленной атмосфере) 2 образца (Б-1, Б-2 с категорией ответственности С-2) и два образца (Б-3, Б-4 категории С-4) размещались в условиях высокоагрессивных воздействий ( $0,08 < K \leq 0,20$ ). Продолжительность коррозионных испытаний для образцов (Б-1, Б-2) составила один год (коррозионные потери эталонных образцов 1350 г/м<sup>2</sup>). Продолжительность коррозионных испытаний для образцов (Б-3, Б-4) составила 2,8 лет (коррозионные потери эталонных образцов 4150 г/м<sup>2</sup>);

- на втором этапе (стендовые силовые испытания) образцы проходили диагностирование ОПКС и закреплялись на опорных элементах испытательного стенда для нагружения и оценки параметров напряженно-деформированного состояния (НДС).

Стенд для определительных испытаний представляет сборно-разборную установку, опорные конструкции, балки – образцы (Б-1...Б-4), профилированный настил, обеспечивающий совместную работу системы пневматического нагружения, тензометрическую аппаратуру для измерения относительных деформаций, механические прогибомеры и индикаторы часового типа, манометр для контроля величины испытательной нагрузки (рис. 1).



Рис. 1. Стендовые силовые испытания балок–образцов с коррозионными повреждениями: а – опорные конструкции и пневматическая система нагружения; б – контроль параметров НДС образца Б-4

Расчетные условия для обратной задачи живучести по данным мониторинга и диагностики ОПКС балочных стальных элементов рабочей площадки представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Постановка и решение обратной задачи живучести конструкций

№№ п/п	Характеристика условий задачи	Обозначение образцов – марка балки			
		Б-1	Б-2	Б-3	Б-4
1.	Определяющие параметры коррозионного состояния				
1.1.	Контролируемое значение годовых коррозионных потерь ( $A_k$ ), г/м <sup>2</sup> год	1350		1480	
1.2.	Коэффициент коррозионных потерь ( $\gamma_{zf}$ )	0,95	0,97	0,86	0,84
1.3.	Срок службы на момент контроля ОПКС ( $T_{km}$ ), год	1,0		2,8	
2.	Алгоритм решения:				
2.1.	Коэффициент обратной связи ( $\psi_m$ ) режима эксплуатации на момент контроля	$\psi_m = 1 - \gamma_{zf}$			
		0,05	0,03	0,14	0,16
2.2.	Интегральный показатель живучести ( $\eta_m$ )	Формула (3)			
		0,16	0,17	0,21	0,19
2.3.	Коэффициент обратной связи ( $\psi_{cr}$ ) для допустимой живучести ( $\eta_{cr}=0,05$ )	$\psi = \Gamma - 1/(1-\eta)$			
		0,19		0,35	
2.4.	Ресурс ( $T_{k\eta}$ ) по критерию живучести ( $\eta_{cr}=0,05$ ), год	$T_{k\eta} = \sqrt[3]{mt\psi_{cr}/A_k}$			
		7,0		13,0	
2.5.	Остаточный ресурс ( $T_{rm}$ ) на момент контроля, год	$T_{rm} = T_{k\eta} - T_{km}$			
		6,0		10,2	
2.6.	Коэффициент готовности ( $K_{gm}$ ) на момент контроля	0,21		0,38	
2.7.	Уровень коррозионной опасности на момент контроля	КП		КІ	
2.8.	Индекс уровня риска коррозионной защищенности (УРКЗ) по данным мониторинга ОПКС:	Формула (1)			
		0,31		0,75	

Программа экспериментальных исследований предусматривала режимы нагружения, при которых балки – образцы сохраняли работоспособное состояние без признаков потери несущей способности. При этом основное внимание уделялось контролю изменения НДС балок – образцов, с учетом различий ОПКС в результате коррозионного разрушения на первом этапе стендовых испытаний. Сравнительная оценка экспериментальных данных, полученных при силовых определительных испытаниях, выявила обоснованность ОПКС и расчетных ситуаций, использованных при анализе НДС балок – образцов Б-1...Б-4. Средняя сходимость расчетных и экспериментальных значений составляет от 10 до 15%.

Анализ условий и параметров прямой и обратной задач живучести по данным табл. 2, 3 позволяет заключить, что установленные взаимосвязи проектных и эксплуатационных показателей надежности обеспечивают достаточные возможности для мониторинга, диагностики и управления рисками по признакам коррозионной защищенности.

**Выводы.** Для обеспечения конструктивной и технологической безопасности промышленных объектов предложен механизм экономического регулирования коррозионной защищенности:

1. Сформулированы определяющие параметры, условия и расчетные ситуации решения прямой и обратной задачи живучести металлоконструкций для оценки индекса УРКЗ по требованиям норм ДСТУ Б В.2.6-193.

2. Логистический подход включает идентификацию угроз по критерию УРКЗ с использованием метода HAZOP и принятие решений ПОН на основе SWOT-анализа запланированных мер поддержания работоспособного состояния СПЗК. При этом мониторинг ОПКС и КСКП обеспечивают выбор и последовательный переход к применению новых ресурсосберегающих технологий защиты от коррозии.

### Литература

1. Королёв В.П. Реинжиниринг для обеспечения технологической безопасности конструкций зданий и сооружений / В.П. Королёв, О.Б. Лотоцкий, Ю.В. Филатов // Промислове будівництво та інженерні споруди, 2008. – №2. – С. 26–33.

2. Demytyev V. Justification of corrosion protection economic efficiency criterion according to design and experimental estimation of building structures / V. Demytyev, O. Gibalenko, P. Korolov // 2nd International Conference “Corrosion and Material Protection”, 19–22th April 2010, Prague, Czech Republic, p. 25–26.

3. Булеев И.П. Нормативно-правове забезпечення технічного стану будівельних конструкцій за рівнем корозійної небезпеки / И.П. Булеев, О.Ф. Коновалов, В.П. Корольов // Промислове будівництво та інженерні споруди, 2011. – № 3. – С. 25 – 29.

4. Korolov V. Management of the Quality of Corrosion Protection of Structural Steel Based on Corrosion Risk Level / V. Korolov, Yu. Filatov, N. Magunova, P. Korolov // Journal of Materials Science and Engineering A & B, Volume 3, Number 11. NewYork: David Publishing Company, 2013. – P. 740 – 747.

5. Исаенко Д.В. Механизмы обеспечения безопасности зданий и сооружений в контексте положений Закона Украины «О регулировании градостроительной деятельности» / Д.В. Исаенко // Промислове будівництво та інженерні споруди, 2012. – №4. – С. 2-7.

6. Шимановський О.В. Концептуальні основи системи технічного регулювання надійності й безпечності будівельних конструкцій / О.В. Шимановський, В.П. Корольов // Промислове будівництво та інженерні споруди, 2008. – №1. – С. 4-9.

7. 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. – С.51.

8. Королёв В.П. Нормативное регулирование надежности и безопасности систем противокоррозионной защиты металлоконструкций / В.П. Королёв, И.В. Кущенко // Промышленное и гражданское строительство, 2016. – № 1. – С. 37 – 42.