УДК 624.014:620.193 DOI: 10.33979/2073-7416-2019-84-4-70-82

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ КОРРОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ

КОРОЛЁВ В.П.

Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, Украина

Аннотация. *Проанализирован процесс управления технологической безопасностью конструкций и сооружений в условиях коррозионной опасности строительных объектов. Высокий уровень износа и предельные сроки службы конструкций зданий и сооружений составляют существенную угрозу, при которой увеличивается вероятность наступления ущерба. Рассмотрены принципы обеспечения технологической безопасности конструкций и сооружений, как неотъемлемой структурной составляющей безопасности предприятия. Показано, что разработка мер программы обеспечения надежности включает квалиметрический мониторинг и риск-диагностику определяющих параметров коррозионного состояния конструкций.*

В данном контексте предложена методика оценки работоспособности корродирующих конструкций с учетом требований процессного подхода к управлению качеством и безопасностью на основе принципов DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control). Выполнена классификация признаков работоспособности по классу безопасности систем противокоррозионной защиты конструкций для обоснования эффективности мер технического обслуживания конструкций по фактическому состоянию.

Теоретически и экспериментально обоснованы методы резервирования средств первичной и вторичной защиты стальных конструкций от коррозии. Представлен практический пример постановки и решения прямой и обратной задач расчетной оценки живучести конструкций в условиях коррозионной опасности. Показаны преимущества технико-экономического обоснования показателей коррозионной защищенности на основе информационных моделей управления технологической безопасностью зданий и сооружений.

Ключевые слова*: работоспособность стальных конструкций, конструктивная и технологическая безопасность, программа обеспечения надёжности, коррозионная защищенность, резервирование, уровень рисков коррозионной опасности*

METHOCAL APPROACH TO ASSURING STRUCTURAL STEEL SERVICABILITY UNDER CORROSION HAZARD

KOROLOV V.P.

Priazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine

Abstract. *The process has been analyzed of monitoring of structure and installation process safety under corrosion hazard of building facilities. A high level of wear and service limits of structures of buildings and installations are the real threat, which increases probability of a loss. The principles are analyzed of assurance of process safety of structures and installations as an integral structural component of the enterprise safety. It is shown that the development of measures of the reliability assurance program comprises the qualimetric monitoring and risk diagnostics of the determining parameters of structural corrosion state.*

As used here, a methodology is proposed for assessing serviceability of corrosive structures taking into account the requirements of the process approach to quality and safety management based on the principles of DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve and Control). Classified are the signs

of serviceability based on the safety class of systems of structure corrosion protection to justify efficiency of measures for structure maintenance based on their actual state.

Methods are theoretically and experimentally justified of redundancy of means of primary and secondary corrosion protection of structural steel. A practical example is presented of setting and solving the direct and inverse problems of the design calculation of structure survivability under corrosion hazard.

***Key words**: structural steel serviceability, structural and process safety, program of reliability assurance, corrosion protection, redundancy, levels of corrosion hazard risks*

Введение

Обеспечение безопасности строительных объектов имеет огромное техническое, экономическое, социальное и политическое значение, носит комплексный характер и охватывает все стадии жизненного цикла конструкций зданий и сооружений [1-4]. Основой для формирования требований безопасности конструкций и сооружений является теория техногенных и природных катастроф, вопросы правового и экономического управления рисками, принципы и методы мониторинга, диагностики и инженерной защиты.

Развитие нормативно-технического регулирования создает объективные условия для эффективного применения современных материалов, увеличения межремонтных сроков эксплуатации строительных конструкций, повышения безопасности зданий и сооружений [5, 6]. Защищенность строительных объектов, наряду с требованиями конструктивной безопасности (пассивного барьера), определяется мерами технологической безопасности (активного барьера). Активируемые барьеры устанавливаются на основе пяти принципов *DMAIC*, связанных с определением, измерением, анализом, усовершенствованием и контролем технического состояния конструкций. Взаимообусловленность требований конструктивной и технологической безопасности ограничивает технико-экономические угрозы возможных отклонений параметров работоспособного состояния конструкций и сооружений.

Как известно, работоспособность характеризует техническое состояние конструкций, при котором объект соответствует функциональному назначению при наличии допустимого уровня риска. Нормальная эксплуатация зданий и сооружений в условиях деградационных процессов определяется принятой концепцией технического обслуживания, устанавливающей выбор проектных решений:

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

Решению проблемы технико-экономического обоснования параметров работоспособности строительных объектов, исходя из условий эксплуатации, надежности и долговечности, посвящены работы научной школы проф. Я.М. Лихтарникова, становление которой в Донбассе связано с 60-70 годами прошлого столетия [7, 8]. Сущность сформированного методического подхода отражают базовые показатели качества металлоконструкций. Проведенные исследования строительных коэффициентов позволили разработать интегральную структуру рангов показателей качества (их весовых коэффициентов). Оценка работоспособности строительных металлоконструкций на основе методов современной квалитологии позволяет формировать модели и алгоритмы анализа рисков методами экспертной квалиметрии [9, 10].

Важным аспектом поддержания эксплуатационных характеристик работоспособности металлоконструкций является создание эффективной системы управления техническим обслуживанием и ремонтом. Наиболее сложные вопросы регулирования технологической безопасности строительных объектов возникают при оценивании показателей ремонтопригодности и живучести конструкций [11-13]. Вместе с этим, новые возможности информационных технологий [14, 15] создают благоприятные условия для накопления и учета данных мо-

ниторинга параметров технического состояния, диагностики и анализа рисков объектов повышенного уровня ответственности.

В связи с практической значимостью подобных задач приобретает очевидную актуальность развитие основных положений, принципов и критериев оценивания работоспособности при техническом обслуживании конструкций и сооружений по фактическому состоянию с учетом технологий построения автоматизированных баз данных и цифрового моделирования технико-экономических рисков. Не вызывает сомнения, что широкий спектр средств обеспечения безопасности должен быть реализован для совершенствования требований технического регулирования строительных объектов в условиях опасных природных и техногенных факторов, среди которых особое внимание вызывают коррозионные воздействия [16, 17].

К сожалению, действующие нормативные документы не содержат указаний по количественной оценке показателей работоспособности металлоконструкций с учетом факторов коррозионного разрушения. Подавляющее большинство ведомственных стандартов о безопасности зданий и сооружений ограничиваются характеристиками коррозионных поражений конструкций и их защитных покрытий в соответствии с рекомендациями Пособия по контролю и восстановлению защиты от коррозии к СНиП 2.03.11-85 [18]. Такой подход не позволяет производить подтверждение соответствия показателей надежности и безопасности и снижает эффективность рационального выбора средств защиты металлоконструкций от коррозии.

Целью исследования является методическое обоснование принципов и задач оценки работоспособности корродирующих конструкций для разработки информационных моделей управления технологической безопасностью зданий и сооружений.

Принципы и методы оценки работоспособности

Снижение работоспособности конструкций связано с необратимыми деградационными процессами случайного характера, протекающими при эксплуатации зданий и сооружений. Коррозионный износ сопровождается накоплением повреждений элементов и их защитных покрытий, что вызывает изменения геометрических характеристик сечений и механических свойств материала конструкций.

Общеизвестно, что описание процесса накопления повреждений имеет громоздкое аналитическое описание в виде вероятностно-физических моделей типа DM-распределения. Инженерная практика диктует требования выявления параметров технического состояния строительных объектов с учетом процессного подхода к управлению качеством (*TQM*) и безопасностью на основе принципов *DMAIC* (рис. 1) [19, 20].

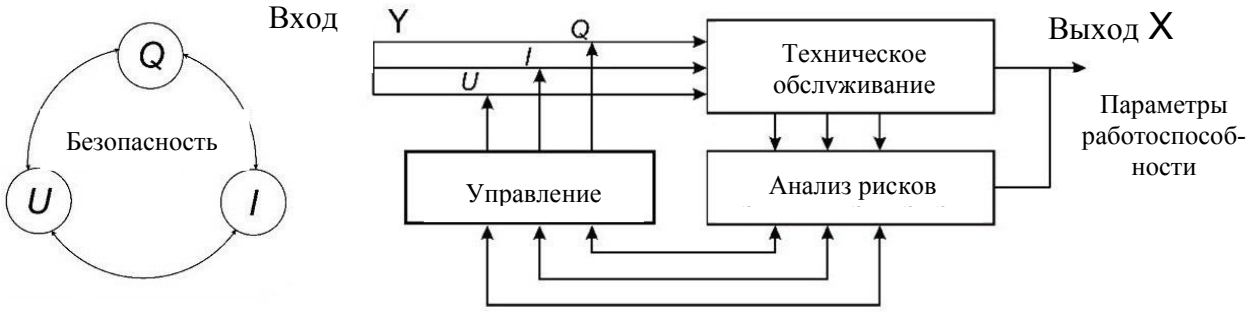

Рисунок 1 – Схема управления безопасностью конструкций зданий и сооружений: техническая Q, информационная I и управленческая U составляющие

Одним из эффективных направлений обеспечения безопасности является разработка программ обеспечения надежности (ПОН) для резервирования работоспособности по результатам квалиметричного мониторинга и риск-диагностики корродирующих конструкций. Контроль параметров работоспособности («выход» системы X) и сравнительный анализ показателей надежности («вход» системы Y) формирует условия выявления опасности (класса риска) и разработки превентивных мер по ограничению или предотвращению коррозионного разрушения (табл. 1). Уровень рисков технологической безопасности устанавливается с учетом групп ответственности, уровня угроз и уязвимости конструкций зданий и сооружений (табл. 2).

Таблица 1 – Условия резервирования надежности на основе параметров работоспособности

Обозначение категории ответственности	Условие резервирования / Признаки соответствия категории ответственности требованиям коррозионной защищенности	Параметры работоспособности				
		Класс риска СПЗК	Критерий единичного отказа защитных покрытий		Коэффициент надежности	
			A_z	h_k, мкм	γ_{zn}	$\gamma_{zк}$
П1	ВР / Допускает снижение декоративных свойств вторичной защиты	3	0,85	-	0,99	0,95
		4	0,90		1,00	0,99
П2	ВР / Не допускает снижения защитных свойств вторичной защиты	3	0,55	-	0,95	0,90
		4	0,60		0,99	0,95
П3	ВР / Допускает снижение защитных свойств вторичной защиты	3	0,40	50	0,90	0,85
		4	0,45	30	0,95	0,90
П4	ПР / Допускает снижение характеристик первичной защиты	3	0,30	100	0,85	0,80
		4	0,35	70	0,90	0,85

Таблица 2 – Риски технологической безопасности (Ri, балл) в зависимости от параметров работоспособности конструкций и сооружений

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

Оценка технологической безопасности корродирующих конструкций выполняется на основе классического метода анализа рисков HAZOP (Hazard and Operability Study), регламентированного требованиями ISO/IEC 31010. Как известно, условия конструктивной безопасности задаются с использованием показателей обобщенной матрицей надежности систе-

мы противокоррозионной защиты конструкций (СПЗК) [16, см. табл. 2]. Подтверждение соответствия характеристик проектной надежности СПЗК и параметров технологической безопасности корродирующих конструкций осуществляется путем идентификации рисков по признакам, установленным в табл. 3. Во многих случаях оценивание класса риска является технико-экономическим обоснованием вариантов корректировки ПОН с учетом фактического технического состояния, результатов диагностики и мер поддержания работоспособности конструкций.

Таблица 3 – Классификация признаков работоспособности по классу безопасности корродирующих конструкций и сооружений

Состояние СПЗК	Класс безопасности	Наименование риска	Характеристика потерь	Уровень риска технологической безопасности (R_i, балл)	Размер потенциального 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

Необходимо отметить, что формирование методической основы (см. рис.1) и регламента требований снижения рисков технологической безопасности зданий и сооружений (см. табл. 1-3) ограничивает неопределенность признаков коррозионной опасности. Такой подход создает условия для обоснованного выбора варианта резервирования мер защиты и восстановления работоспособного состояния корродирующих конструкций с учетом всех стадий жизненного цикла строительного объекта (рис.2).

По определению риск является функцией вероятности реализации угрозы, а также величины возможного ущерба. Принципиальной особенностью является взаимосвязь качественных и количественных показателей оценки рисков. Вместе с этим, для структурирования входных данных при оценке рисков, необходим интегральный показатель, который определяет базисную основу анализа и принятия решений. По мнению авторов работы [19], таким комплексным критерием может служить индекс уровня риска коррозионной защищенности (УРКЗ):

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

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^3, м^2, 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 механиз-

ма 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.

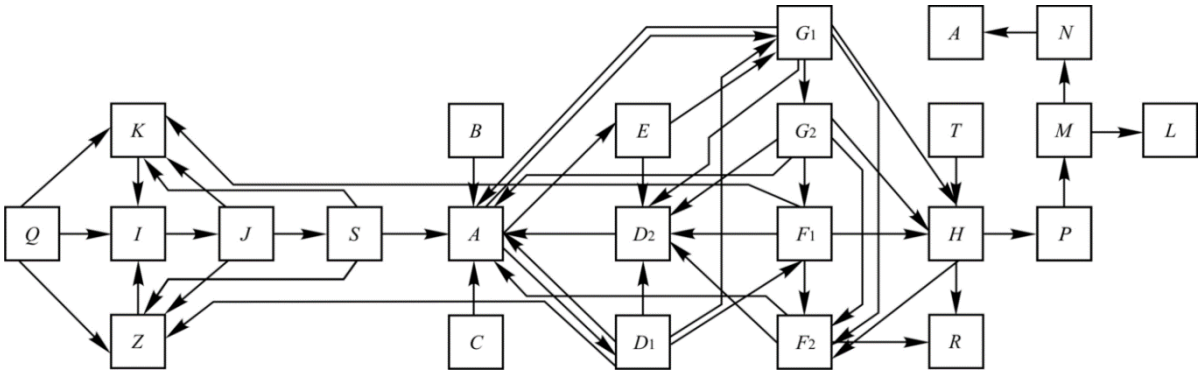

Рисунок 2 – Обобщенная структурная модель работоспособности по признакам коррозионной опасности: A - сохранение объектом исправного состояния в период нормальной эксплуатации; B - нарушение исправного состояния технологического оборудования и изменение степени агрессивности воздействий; C - нарушение работоспособного состояния ограждающих конструкций и изменение степени агрессивности воздействий; D_1 - нарушение работоспособного состояния противокоррозионной защиты и появление коррозионных поражений; D_2 - восстановление работоспособного состояния противокоррозионной защиты; E - нарушение исправного состояния противокоррозионной защиты; F_1 - нарушение исправного состояния в результате коррозионно-механических повреждений; F_2 - восстановление работоспособного состояния резервироваем мер защиты конструктивного элемента; G_1 - нарушение исправного состояния в результате отклонения фактического состояния конструкции от предусмотренного проектом; G_2 - восстановление исправного состояния по проектным требованиям; H - нарушение работоспособности по признакам коррозионной опасности стальных конструкций; T - введение конструктивно-технологических ограничений для восстановления работоспособного состояния; R - продление ресурса за фактическим сроком службы объекта путем восстановления работоспособного состояния; P - переход объекта в предельное состояние (аварийный режим); M - вывод из эксплуатации; L - ликвидация (демонтаж) объекта; N - замена (монтаж) новой конструкции или сооружения

Исходя из индикаторного подхода, живучесть отражает интегральные свойства корродирующих конструкций, позволяющие сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов и повреждений. Количественные показатели живучести существенно зависят от параметров работоспособности конструкций и сооружений. Поэтому, в качестве обобщенной характеристики работоспособного состояния конструкций при квалиметричном мониторинге установливается уровень риска технологической безопасности. Для корродирующих конструкций живучесть характеризует способность мер первичной и вторичной защиты от коррозии противодействовать деградационным процессам до частичного или полного восстановления работоспособного состояния. Резервирование корродирующих конструкций на уровне приемлемого риска включает четыре последовательных этапа: задание показателей надежности (долговечность, ремонтопригодность); выбор условий резервирования первичной и вторичной защиты (класс надежности и класс безопасности); обоснование критерия живучести с учетом единичного отказа средств защиты; разработку спецификации восстановления работоспособности СПЗК.

Резервирование надежности СПЗК направлено на изменение оценённого состояния коррозионной опасности (KI - KV) и переход к режиму коррозионной защищенности строи-

тельного объекта (ZI - ZIV) [17, 20]. Элементы ПОН *f* - стратегии рассчитаны на реализацию принципов функционального и временно́го резервирования коррозионной защищенности стальных конструкций. Средства защиты *f* - стратегии призваны обеспечить коррозионную стойкость конструкций (ПР - первичное резервирование) и долговременную защиту (ВР - вторичное резервирование). Временно́е резервированиесвязано с расчетно-измерительным методом определения долговечности и ремонтопригодности. Элементы *s* – стратегии требуют контроля параметров живучести и послеремонтной несущей способности. При этом для элементов ПОН *s* – стратегии существенным является наличие эффективной системы мониторинга, диагностики и принятия решений на основе анализа рисков мер первичной и вторичной защиты для восстановления работоспособности конструкций зданий и сооружений.

На основе представленного анализа можно заключить, что работоспособность стальных конструкций может быть обеспечена при поэтапном рассмотрении задач временно́го резервирования несущей способности стальных конструкций с учётом функциональной живучести систем коррозионной защищённости в области приемлемого риска последствий коррозионно-механического разрушения.

Экспериментальное обоснование моделей резервирования

Основными входными данными для идентификации работоспособности по методу HAZOP являются определяющие параметры коррозионного состояния (ОПКС), а также цели и функциональные задачи обеспечения конструктивной безопасности СПЗК (см. табл. 1). С позиций квалиметричного мониторинга задача контроля ОПКС включает оценку условий технологической безопасности (R_i, балл) на уровне приемлемого или допустимого рисков и разработку мер технического обслуживания по фактическому состоянию. При выявлении критических значений (R_i=7 – 8 баллов) устранение негативных последствий изменения эксплуатационной несущей способности производится на основе расчета или испытаний корродирующих конструкций.

В работе [19] сформулированы условия прямой и обратной задачи расчетной оценки живучести. Прямая задача отражает требования конструктивной безопасности на стадии проектирования: по заданным показателям матрицы надежности СПЗК определить фиктивную коррозионную нагрузку (A_f). Работоспособность корродирующих конструкций связана с условиями обратной задачи расчета живучести: по измеренным ОПКС выбрать модель восстановления стальных конструкций.

Рассмотрим условия прямой задачи живучести на примере расчета параметров конструктивной безопасности балочных стальных элементов рабочей площадки (табл. 4).

Для экспериментальной проверки методики оценки работоспособности по признакам коррозионной опасности 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 П-1) и два образца (Б-3, Б-4 категории П-3) 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 1600 г/м^2). Продолжительность коррозионных испытаний для образцов (Б-3, Б-4) составила 2,8 лет (коррозионные потери эталонных образцов 4700 г/м^2);
- на втором этапе (стендовые силовые испытания) образцы закреплялись на опорных элементах испытательного стенда и проходили диагностирование ОПКС путем нагружения и оценки параметров напряженно-деформированного состояния (НДС).

Таблица 4 – 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	КIII		КII	
1.2.	Характеристическое значение годовых коррозионных потерь (A_n), г/м^{2}год	1200			
1.3.	Коэффициент готовности (K_g)	0,10		0,22	
1.4.	Категория ответственности	С-2		С-4	
1.5.	Коэффициент надежности (γ_{zk})	0,90		0,80	
2.	Алгоритм решения:				
2.1.	Фиктивная коррозионная нагрузка (A_f): m=7,85·10^4 - переводной коэффициент коррозионных потерь, г/см^3; t – приведенная толщина сечения элемента, см.	$A_f = (1-\gamma_{zk})mt;$			
		3140		6280	
2.2.	Сроки службы: конструкций ($T_{n\gamma}$)/ первичной защиты ($T_{k\gamma}$); коэффициент кинетики коррозионного износа для стали С235 c=0,78; коэффициент надежности по воздействиям γ_{fk}=1,2.	$T_{zk} = \sqrt[c]{A_f / \gamma_{fk} A_n};$			
		30/3,0		30/6,5	
2.3.	Отношение резерва надежности (Г):	$\Gamma = \Phi / N;$			
		1,24		1,4	
2.4.	Проектный индекс уровня риска коррозионной защищенности (УРКЗ):	Формула (1)			
		0,41		0,50	

Стенд для определительных испытаний (рис. 3) 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.

а) опорные конструкции и пневматическая система нагружения

б) контроль параметров НДС образца Б – 4

Рисунок 3 – Стендовые силовые испытания балок – образцов с коррозионными повреждениями

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.

Расчетные условия для обратной задачи живучести по данным квалиметричного мониторинга и диагностики ОПКС балочных стальных элементов рабочей площадки представлены в табл. 5.

Таблица 5 – 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^{2}год	1350		1480	
1.2.	Коэффициент коррозионных потерь (γ_{zf})	0,95	0,97	О,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 (ψ_m) режима эксплуатации на момент контроля	$\psi_m = 1 - \gamma_{zf}$;			
		0,05	0,03	0,14	0,16
2.2.	Интегральный показатель живучести (η_m)	$\eta = \mathbf{1} - 1/(\mathbf{\Gamma}-\psi)$			
		0,16	0,17	0,21	0,19
2.3	Коэффициент обратной связи (ψ_{cr}) для допустимой живучести (η_{cr}=0,05)	$\psi = \mathbf{\Gamma} - 1/(1-\eta)$			
		0,19		0,35	
2.4.	Ресурс ($T_{k\eta}$) по критерию живучести (η_{cr}=0,05), год	$T_{k\eta} = \sqrt[c]{mt\psi_{cr}/A_k}$;			
		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_{qm}) на момент контроля	0,21		0,38	
2.7.	Уровень коррозионной опасности на момент контроля	КII		КI	
2.8.	Индекс уровня риска коррозионной защищенности (УРКЗ) по данным мониторинга ОПКС:	Формула (1)			
		0,31		0,75	

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 составила от 10 до 15%.

Анализ условий прямой и обратной задач живучести по данным моделирования параметров конструктивной (табл. 4) и технологической безопасности (табл. 5) позволяет заключить, что выявленные взаимосвязи проектных и эксплуатационных показателей надежности устраняют неопределенность признаков коррозионной опасности. Таким образом, результаты квалиметрического мониторинга и диагностики корродирующих конструкций позволяют формировать информационную базу данных для технического обслуживания конструкций по фактическому состоянию с учетом приемлемого уровня риска (рис. 4).

Повышение работоспособности по условиям функционального резервирования стальных конструкций осуществляется заданием требуемого класса надежности СПЗК посредством избыточности мер первичной и вторичной защиты по сравнению с минимально необходимыми для выполнения установленных функций строительного объекта. Квалиметрическое обоснование работоспособности корродирующих конструкций создает возможность подтверждения соответствия расчетных критериев временного резервирования (долговечности, живучести, ремонтопригодности).

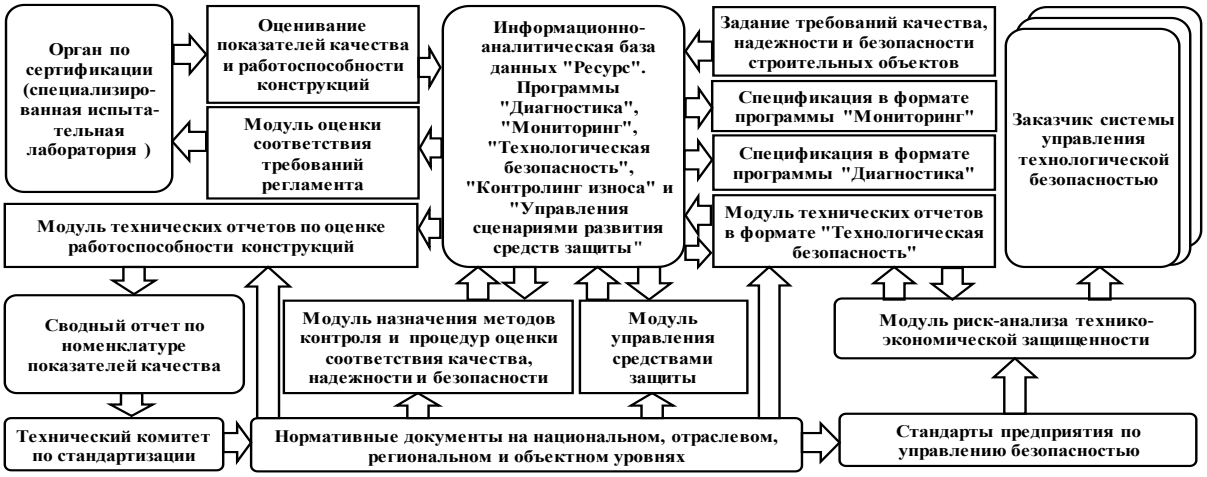

Рисунок 4 – Организационно-методическая схема управления технологической безопасностью строительных объектов

Следует отметить, что постановка и решение прямой и обратной задач оценки живучести отражает требования технико-экономического анализа для сбалансированного применения средств и методов первичной и вторичной защиты от клоррозии. Представленные задачи содержат объективные данные для сравнительного анализа эффективности мер первичной и вторичной защиты с учетом индексного задания коэффициента сочетания элементов коррозионной защищенности (СЭКЗ):

$$СЭКЗ= ЗСЗК(II)/ЗСЗК(I), \quad (2)$$

где ЗСЗК(I) –затраты на систему первичной защиты от коррозии;

ЗСЗК(II) – затраты на систему вторичной защиты от коррозии.

Разработанная процедура организационно-методического управления технологической безопасностью (см. рис. 4) обеспечивает обоснованное и своевременное принятие решений для поддержания работоспособности конструкций при техническом обслуживании по фактическому состоянию.

Выводы

1. Обеспечение надежности и безопасности строительных объектов в условиях коррозионной опасности требует совершенствования нормативно-технических положений и принципов оценки работоспособности конструкций и сооружений. Снижение эксплуатационных затрат на поддержание надежности конструкций при техническом обслуживании по фактическому состоянию связано с анализом угроз, оценкой уязвимости и идентификацией рисков коррозионного разрушения.

2. Разработанная методика управления технологической безопасностью предполагает проведение квалиметричного мониторинга (служба технической эксплуатации объекта) и риск-диагностики корродирующих конструкций (экспертная организация). При этом, формирование ПОН осуществляется в соответствии с требованиями, включающими оценку критериев функционального и временно́го резервирования средств коррозионной защищенности. Сформулированы и экспериментально апробированы условия решения прямой и обратной задач подтверждения соответствия живучести корродирующих конструкций с учетом ОПКС.

3. Представленные в статье принципы и задачи оценивания работоспособности в условиях коррозионной опасности создают условия для информационного моделирования параметров долговечности, живучести и ремонтопригодности конструкций и их защитных покрытий. Таким образом, инструментарий метода анализа рисков HAZOP, примененный

для управления технологической безопасностью корродирующих конструкций с учетом приемлемого риска СПЗК, может быть реализован для пересмотра положений Пособия [18] и технико-экономического обоснования восстановления средств первичной и вторичной защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михеев Д.В. О системе технического регулирования в строительстве // Строительство и реконструкция. 2016. №3 (65). С. 5-9.
2. Абелев М. Ю., Махова И. Д. Современное страхование строительных рисков // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 4. С. 7-10.
3. Мамин А. Н., Кодыш Э. Н., Бобров В. В. Разработка нормативной документации в области эксплуатации зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 6. С. 24-27.
4. Ведяков И. И., Еремеев П. Г., Соловьев Д. В. Научно-техническое сопровождение и нормативные требования при реализации проектов зданий и сооружений повышенного уровня ответственности // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 12. С. 14-19.
5. Ведяков И. И., Одесский П. Д., Гуров С. В. О нормировании материалов в новом своде правил СП 16.13330.2017 "СНиП II-23-81* Стальные конструкции" // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 8. С. 61-69.
6. Степанова В. Ф., Розенталь Н. К., Чехний Г. В. Актуализация Свода правил 28.13330.2017 "Защита строительных конструкций от коррозии"// Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 3. С. 19-25.
7. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. – М.: Стройиздат, 1979. – 319 с.
8. Лихтарников Я.М., Летников Н.С., Левченко В.Н. Технико-экономические основы проектирования строительных конструкций. – Киев – Донецк: Вища школа, 1980. –240 с.
9. V. Korolov, Yu. Filatov, N. Magunova, P. Korolov. Management of the Quality of Corrosion Protection of Structural Steel Based on Corrosion Risk Level // Journal of Materials Science and Engineering A & B, V.3, No. 11. NewYork: David Publishing Company, 2013. pp. 740 – 747.
10. Королёв В.П. Требования качества, надежности и безопасности для управления коррозионной защищенностью металлоконструкций и сооружений / Научный электронный журнал «Вестник науки и образования Северо-запада России», 2018, Т.4, №3, http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2018/08/2018-N3-Korolov.pdf
11. Бузало Н.А., Канунников А.В. Определение коэффициента значимости строительных конструкций при оценке технического состояния зданий // Строительство и реконструкция. 2018. №3 (77). С. 3-11.
12. Турков А.В Метод оценки живучести систем с использованием весовых коэффициентов отдельных элементов стальных конструкций // Строительство и реконструкция. 2016. №4 (66). С. 56-63.
13. Туснин А. Р., Бергер М. П. Расчет фермы с поврежденными элементами // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 11. С. 35-41.
14. Беляев А. В., Антипов С. С. Жизненный цикл объектов строительства при информационном моделировании зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 1. С. 65-72.
15. Князева Н. В. Интеграция информационных систем служб эксплуатации с информационной моделью здания // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 9. С. 68-72.
16. Королёв В.П. Нормативное регулирование надежности и безопасности систем противокоррозионной защиты металлоконструкций / В.П. Королёв, И.В. Кущенко // Промышленное и гражданское строительство. – М.: ПГС, 2016. – № 1. – С. 37-42.
17. KorolovV.P. Structural Survivability Reserve Planning Based On Analysis Of Corrosion Hazard Of Industrial Facilities / Korolov P.V., Godun T.N., Trofimchuk T.S. // EUROCORR-2017. 20th International Corrosion Congress & Process Safety Congress 2017 / 3-7 September 2017, Prague, Czech Republic / / Book of Abstracts.
18. 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., Королев В.П. и др. М.: Стройиздат, 1989. 51 с.
19. Королёв П.В., Королёв В.П. , Кущенко И.В.. Управление рисками коррозионной защищенности при решении прямой и обратной задач живучести стальных конструкций // Вестник Одесской государственной академии строительства и архитектуры. – Одесса: ОГАСА, 2016. – № 63. – С. 67-75.
20. Королёв В.П. Управление безопасностью на основе инноваций технико-экономической защищенности инфраструктурных объектов / Олимпийское наследие и крупномасштабные мероприятия: влияние на экономику, экологию и социокультурную сферу принимающих дестинаций / Материалы X Междунар. науч.-практ. конф., Сочи, 17-18 мая 2018 г. – Сочи: РИЦ ФГБОУ ВО «СГУ», 2018. – 306 с.

REFERENCES

1. Mikheyev D. O sistyemye tekhnicheskogo ryegulirovaniya v stroityelstvye [About system of technical regulation in construction]. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2016. No.3 (65). Pp. 5-9. (rus)
2. Abyelyev M.Yu., Makhova I.D. Sovryemennoye strakhovaniye stroityelnykh riskov [Modern insurance of construction risks]. Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2018. No.4. Pp. 7-10. (rus)
3. Mamin A.N., Kodysh E.N., Bobrov V.V. Razrabotka normativnoy dokumentatsii v oblasti ekspluatatsii zdaniy I sooruzheniy [Delopment of regulations in the field of usage of buildings and installations]. Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2018. № 6. Pp. 24-27. (rus)
4. Vyedyakov I.I., Yeryemyeyev P.G., Solovyev D.V. Nauchno-tekhnicheskoye soprovozhdeniye Ii normativnyye tryebovaniya pri realizatsii proyectov zdaniy I sooruzheniy povyshennogo urovnya otvetstvyennosti [Scientific and technical support and regulatory requirements when implementing designs of buildings and installations of a high criticality level]. Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2018. No.12. Pp. 14-19. (rus)
5. Vyedyakov I.I., Odyessky P.D., Gurov S.V. O normirovanii matyerialov v novom svodye pravil SP16.13330.2017 "SNiP II-23-81* Stalnyye konstruktsii" [About the rationing of materials in the new set of rules SP 16.13330.2017 "SNiP II-23-81* Steel structures"]. Promyshlyennoye i grazhdanskoye. stroitel'stvo. 2018. No. 8. Pp. 61-69. (rus)
6. Stepanova V.F., Rozental N.K., Chehkniy G.V. Aktualizatsiya svoda pravil 28.13330.2017 "Zaschita stroityelnykh konstruktsiy ot korrozii" [Updating of Code 28.13330.2017 "Corrosion protection of building structure]. Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2018. No3. Pp. 19-25. (rus)
7. Likhtarnikov Ya.M. Variantnoye proyektirovaniye i optimizatsiya stalnykh konstruktsiy [Trial design and optimization of structural steel]. Moscow. Stroyizdat. 1979. 319 p. (rus)
8. Likhtarnikov Ya.M., Lyetnikov N.S., Lyevchyenko V.N. Tekhniko-ekonomichyeskiye osnovy proektirovaniya stroityelnykh konstruktsiy [Technical and economic basis for design of building structures]. Kiev-Donetsk. Vyshcha shkola. 1980. 240 p. (rus)
9. V. Korolov, Yu. Filatov, N. Magunova, P. Korolov. Management of the Quality of Corrosion Protection of Structural Steel Based on Corrosion Risk Level. Journal of Materials Science and Engineering A & B, V.3, No. 11. NewYork. David Publishing Company, 2013. Pp. 740 – 747.
10. Tryebovaniya kachestva, nadyezhnosti i bezopasnosti dlya upravlyeniya korrozionnoy zashchishchyennostyu metallokonstruktsiy I sooruzheniy [Quality, Reliability and Safety Requirements for Management of Corrosion Protection of Structural Steel and Installations]. Electronic scientific journal "Vestnik nauki i obrazovaniya Syevero-zapada Rossii". 2018.V. 4. No 3. (rus) http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2018/08/2018-N3-Korolov.pdf
11. Buzalo N.A.,Kanunnikov A.V. Opryedyelyeniye koeffitsiyenta znachimosti stroityelnykh konstruktsiy pri ottsyenkye tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy [Determination of the coefficient of significance of building structures in assessing the technical condition of buildings]. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2018. No 3 (77). Pp. 3-11. (rus)
12. Turkov A. V. Myetod otsyenki zhivuchyesti sistyem s ispolzovaniyem vesovykh koeffitsiyentov otdyelnykh elyemyentov stalnukh konstruktsiy [Method of assessment of survivability using weights factors of elements of steel structures]. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2016. No 4 (66). Pp. 56-63. (rus)
13. Tusnin A.R., Byergyer M.P. Raschyet fyermy s povrezhdyennymi elyemyentami [Analysis of truss with damaged members]. Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2018. No 11.Pp. 35-41. (rus)
14. Byelyayev A.V., Antipov S.S. Zhiznyennyy tsikl obyektov stroityelstva pri informatsionnom modelirovanii zdaniy I sooruzheniy [Life cycle of construction facilities in the course of information modeling of buildings and installations. Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2019. No.1. Pp. 65-72. (rus)
15. Knyazyeva N.V. Integratsiya informatsionnykh system sluzhb ekspluatatsii s informatsionnoy modelyu zdaniya [Integration of information system of maintenance service with information model]. Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2018. No. 9. Pp. 68-72. (rus)
16. Korolov V.P. Kushchenko I.V.Normativnoye regulirovaniye nadyezhnosti I bezopasnosti sistyem protivokorrozionnoy zashchity metallokonstruktsiy [Regulatory control of reliability and safety of structural steel corrosion protection system. Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. Moscow. PGS. 2016. No1. Pp. 37-42. (rus)
17. Korolov V.P. Structural survivability reserve planning based on analysis of corrosion hazard of industrial facilities. Korolov P.V., Godun T.N., Trofimchuk T.S. EUROCORR-2017. 20th International Corrosion Congress & Process Safety Congress 2017. 3-7 September 2017, Prague, Czech Republic. Book of Abstracts.
18. Golubyev A.I., Gorokhov Ye.V., Korolov V.P. and others. Posobiye po kontrolyu sostoyaniya stroityelnykh metallichyeskikh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy 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)]. Moscow. Stroyizdat. 1989. 51 p. (rus)
19. Korolov P.V., Korolov V.P., Kushchenko I.V. Upravlyeniye riskami korrosionnoy zashchishchyennosti pri reshenii pryamoy i obratnoy zadach zhivuchesti stalnykh konstruktsiy [Corrosion protection risk management in

solving the direct and inverse problems of structural steel survivability]. Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. 2016. No 63. Pp.67-75.

20. Korolov V.P. Upravlyeniye bezopasnostyu na osnove innovatsiy tekhniko-economichyeskoy zashchishchyennosti infrastrukturnykh obyectov. Olimpiyskoye naslyediye I krupnomasshtabnyye meropriyatiya: vliyaniye na ekonomiku, ekologiyu I sotsiokulturnuyu sferu prinimayushchikh destinatsiy. [Safety management based on innovation of technical and economic protection of infrastructure facilities. Olympic legacy and mega-events: Economic, ecological, social and cultural impact on hosting destinations]. Matyerialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konfyeryentsii [Proceedings of X International Scientific and Practical Conference]. Sochi. May 17-18 2018. Sochi. RITS FGBOU VO "SGU". 306 p.

Информация об авторах:

Королёв Владимир Петрович
Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, Украина,
доктор технических наук, профессор, председатель подкомитета ПК-4 «Противокоррозионная защита в металлостроительстве» технического комитета ТК-301 «Металлостроительство»,
E-mail: center_sts@ukr.net

Information about authors:

Korolov Vladimir P.
Priazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Chairman of Sub-committee PK-4 «Corrosion Protection in Metal Construction» of Technical Committee
TK-301 «Metal Construction».
E-mail: center_sts@ukr.net