

МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ КОРОЗІЙНОЮ ЗАХИЩЕНІСТЮ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

В. П. КОРОЛЬОВ¹, О. М. ГІБАЛЕНКО², П. В. КОРОЛЬОВ³

¹Донбаський центр технологічної безпеки

ТОВ "Укрінсталькон ім. В. М. Шимановського", Маріуполь;

²ДВНЗ "Приазовський державний технічний університет", Маріуполь;

³ТОВ "Студія комфорту", Одеса

Проаналізовано інноваційні аспекти формування і розвитку корозійної захищеності. Запропоновано ризик-орієнтований підхід до подолання невизначеності параметрів корозійної захищеності конструкцій і споруд згідно з вимогами розгортання функції якості *QFD*. Встановлено номенклатуру, показники і методи *off-line* та *on-line* контролю (оцінки відповідності) визначальних параметрів корозійного стану конструкцій та їх захисних покриттів. Доведено, що процедура прийняття і контролю збалансованих рішень протикорозійного захисту сприяє переходу від витратного до інноваційного управління ресурсозбереженням і технологічною безпекою промислових об'єктів.

Ключові слова: *корозійна небезпека, визначальні параметри корозійного стану, корозійна захищеність, оцінювання відповідності, граничні стани, інноваційний потенціал, ризик-орієнтований підхід, збалансовані показники, ресурсозбереження, промислові об'єкти.*

The innovative aspects of the formation and development of corrosion protectability is analyzed as an important element of the state technical and economic policy in the field of quality and safety of industrial facilities. A risk-based approach is proposed to overcome the uncertainty of parameters of corrosion protectability of structures and installations according to the requirements of the quality function deployment (QFD). The nomenclature, indices and methods of the off-line and on-line monitoring (conformity assessment) of the determinative parameters of the corrosion state of structures and their protective coatings are established. It is proved that the procedure of making and checking the balanced decisions of corrosion protection promotes switch from the costly to innovative management of resource saving and technological safety of industrial enterprises.

Keywords: *corrosion hazard, determinative parameters of the corrosion state, corrosion protectability, conformity assessment, limit states, innovative potential, risk-based approach, balanced indices, resource saving, industrial facilities.*

Вступ. Під час тривалого функціонування промислові об'єкти піддаються корозійному руйнуванню, що призводить до поступового зниження первинних техніко-експлуатаційних властивостей конструкцій і споруд. Дослідження впливу процесів старіння та зносу на можливість аварійного руйнування металевих конструкцій – одне з найважливіших завдань технологічної безпеки [1–3], що дасть можливість зменшити витрати на захист основних засобів від дії агресивних середовищ, вдосконалити заходи управління корозійною захищеністю за результатами оцінювання якості, надійності та експлуатаційної придатності [4–7].

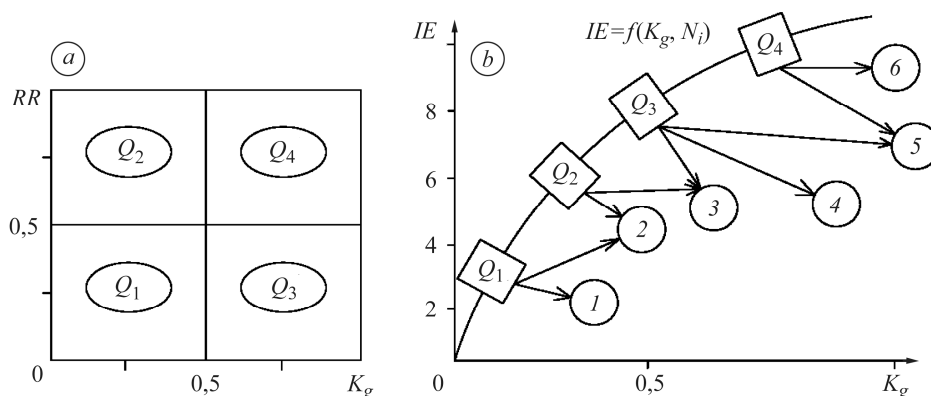
Сьогодні набуває значущості процесний підхід до подолання невизначеності загроз корозійної небезпеки промислових об'єктів [3, 4]. Сформувані єдиний інноваційний потенціал корозійної захищеності основних засобів для комплексної характеристики розвитку систем протикорозійного захисту конструкцій пропону-

ють методами індексної кваліметрії. При цьому створюють умови для обґрунтування збалансованих показників первинного та вторинного захисту, спрямованих на управління ризиками з використанням адаптаційних і превентивних інструментів підвищення ефективності основних засобів підприємств [6, 7].

Як мимовільне руйнування корозія зумовлена термодинамічною нестійкістю металів і залежить від зміни потенціалу Гіббса ($\Delta G < 0$). За інноваційним потенціалом корозійної захищеності можна охарактеризувати можливості системи протикорозійного захисту конструкцій (СПЗК) задовольняти вимоги техніко-економічної безпеки промислових об'єктів за прийнятим ризиком. Таким чином, використовують механізми прийняття управлінських рішень згідно з нормами ДСТУ Б В.2.6-193, що дають можливість передбачати безпеку, надійність і ефективність засобів і методів захисту від корозії на всіх стадіях життєвого циклу промислових об'єктів.

Нижче обґрунтовано інструменти інноваційного потенціалу корозійної захищеності для формування ризик-орієнтованого управління технологічною безпекою конструкцій та споруд промислових підприємств.

Інструменти управління корозійною захищеністю. Складні аспекти управління та виявлення, систематизації та запобігання загроз за рівнем технологічної безпеки конструкцій та споруд добре узгоджуються з теоретичними положеннями конструктивної теорії інформації та потенційної ефективності, розвинутої в працях Б. С. Флейшмана [8]. Теорія потенційної ефективності є синтезом теорій надійності, інформації та ігор, які об'єднані фундаментальним поняттям цілеспрямованого вибору. Основні дефініції ефективності, надійності, робото-здатності і керованості подано як ймовірність досягнення мети за обмежених ресурсів (часу, матеріалів, енергії тощо). Виконані останнім часом дослідження [6] засвідчили, що, приймаючи рішення шляхом запровадження процесно-орієнтованого підходу, створюють можливості використання стратегії розвитку циклів СПЗК (рис. 1). Запропонована матриця циклів економічного розвитку (рис. 1а) орієнтована на поведінкову економічну теорію, в якій використовують модель "обмеженої раціональності" Г. Саймона [9].



Матриця управління (а) та моделі раціонального вибору (б) циклів розвитку СПЗК:
 Q_1 – антикризовий цикл; Q_2 – ресурсний; Q_3 – мотивований; Q_4 – збалансований.
 Моделі раціонального вибору: 1 – обмежування; 2 – витрат; 3 – якості;
 4 – надійності; 5 – контролінгу; 6 – безпеки.

Matrix of management (a) and models for rational choice (b) of the development of the cycles of the system of construction corrosion protection : Q_1 – antirecessionary cycle;
 Q_2 – life; Q_3 – motivated; Q_4 – balanced. Rational choice models:
 1 – limitation; 2 – costs; 3 – quality; 4 – reliability; 5 – controlling; 6 – safety.

Тому цикли розвитку СПЗК передбачають застосування моделей раціонального вибору (рис. 1b), які враховують складність і корисність техніко-економічного обґрунтування за умов корозійної захищеності (ZI–ZIV) або корозійної небезпеки (KI–KV) згідно з нормативними значеннями комплексного показника ремонтпридатності K_g (коефіцієнта готовності) (табл. 1).

Таблиця 1. Матриця вибору рівня надійності СПЗК

Ступінь агресивності вплив K , mm/year	Інтервальні оцінки коефіцієнта готовності захисту проти корозії K_g				
	$0 < K_g \leq 0,1$	$0,1 < K_g \leq 0,3$	$0,3 < K_g \leq 0,5$	$0,5 < K_g \leq 0,7$	$0,7 < K_g \leq 1$
Слабо-агресивні $0,01 < K \leq 0,05$	KI	ZIV	ZIII	ZII	ZI
Низько-агресивні $0,05 < K \leq 0,15$	KII	KI	ZIV	ZIII	ZII
Високо-агресивні $0,15 < K \leq 0,3$	KIII	KII	KI	ZIV	ZIII
Дуже високо-агресивні $0,3 < K \leq 0,5$	KIV	KIII	KII	KI	ZIV
Сильно-агресивні $K > 0,5$	KV	KIV	KIII	KII	KI

За оцінюванням кваліметричних індексів норми дохідності інновацій (RR) та інтегральної ефективності (IE) можна порівняльно сценарно проектувати заходи протикорозійного захисту конструкцій будівель та споруд [7]. Функціональна залежність інтегральної ефективності (IE) поєднує техніко-економічні показники і потрібний обсяг інформації (N_i) моделей раціонального вибору СПЗК.

Застосовуючи методи управління технологічною безпекою, засновані на зростанні інноваційного потенціалу корозійної захищеності, вдається уникнути загроз, викликаних корозійним руйнуванням металоконструкцій (табл. 2). При цьому афектні і традиційні рівні прийняття рішень, як правило, ґрунтуються на застарілих поняттях і оцінках якості СПЗК. Водночас, застосовуючи ціннісно-раціональні і цілеспрямовані підходи ризик-аналізу ринкової інфраструктури матеріалів і послуг, досягають збалансованих економічних критеріїв та впровадження логістичних методів вибору раціональних рішень СПЗК за прийнятним ризиком (табл. 3).

Обґрунтовано, що найуспішнішою для бізнесу є модель інноваційно-інвестиційного розвитку, яка розглядає використання конкурентних переваг підвищення якості, надійності і безпеки промислових об'єктів. Збалансовані індикатори управління корозійною захищеністю встановлюють за результатами спеціальних вимірювань визначальних параметрів корозійного стану (ВПКС) згідно з національними стандартами Єдиної системи захисту від корозії, старіння і біопшкоджень. Кваліметрично техніко-економічні показники корозійної захищеності, зокрема корозійної тривкості (ступеня впливу середовища) та терміну служби захисних покриттів, оцінюють, беручи до уваги компенсаційний складник корозійних втрат (КСКВ), який характеризує розмір фінансових коштів, пов'язаних із втратою показників якості і довговічності конструкцій та їх захисних покриттів.

Таблиця 2. Матриця ризиків технологічної безпеки (R_i , бал) залежно від рівня надійності СПЗК, загроз і вразливості конструкцій

Рівень СПЗК	Загрози (категорія технічного стану)														
	низька (I)			обмежена (II)			середня (III)			висока (IV)			гранична (V)		
	Оцінка вразливості (категорія відповідальності)														
	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

Таблиця 3. Класи ризиків СПЗК залежно від розміру потенційних збитків

Стан СПЗК	Клас ризику	Ризик	Характеристика втрат	Рівень технологічної безпеки (R_i , бал)	Розмір потенційного збитку, * м.р.з.п.
Корозійна небезпека	1	Катастрофічний	Часткова або повна втрата будівель та споруд	9–10	> 72500
	2	Критичний	Втрати перевищують розрахункові суми валового доходу відновлення об'єктів	7–8	25000–72500
Корозійна захищеність	3	Допустимий	Втрати не перевищують розрахункові суми прибутку від подовження ресурсу та технологічного оновлення об'єктів	5–6	2500–25000
	4	Прийнятний	Втрати не перевищують витрат на підтримку якості впродовж терміну експлуатації	1–4	< 2500

* м.р.з.п. – мінімальний розмір заробітної платні.

Методи контролю та критерії надійності. Оцінювали відповідність показників якості первинного і вторинного захисту у будівництві Технічному регламенту будівельних виробів, будівель і споруд за вимогами ДСТУ Б В.2.6-193. Корозійну захищеність науково-методично обґрунтували шляхом активного ек-

перименту за планом дрібної репліки 2^{15-10} [10]. Для розрахунків показників якості СПЗК використали результати гравіметричного (первинний захист) і кваліметричного (вторинний захист) контролю:

$$A_{i,j} = a_0 \sum_{i=0}^{i=N} \sum_{j=0}^{j=L} a_{i,j} / T_k, \quad (1)$$

$$A_z = \sum_{i=1}^{i=N} B_i X_i, \quad (2)$$

де $A_{i,j}$ – системна змінна корозійних втрат, $g/(m^2 \cdot year)$; $a_{i,j}$ – вагова характеристика параметрів конструктивної форми (i, j); $a_0, g/m^2$ – корозійні втрати сталі С235 під час визначальних корозійних випробувань; $T_k, year$ – період часу для встановлених корозійних втрат; A_z – узагальнений показник захисних властивостей покриттів; B_i – коефіцієнт вагомості виду руйнування; X_i – відносна оцінка i -го виду руйнування; i – кількість видів руйнування.

Застосовуючи репрезентативні вибірки даних, отриманих під час пришвиджених (*of-line* контроль) або стендових випробувань (*on-line* контроль), відпрацювали якісні та кількісні параметри кваліметричного моніторингу та ризик-діагностики для визначення критеріїв граничних станів і технологічної безпеки сталевих конструкцій та споруд (табл. 4). За результатами досліджень удосконалили вимоги технічних регламентів промислових об'єктів [4, 6, 7].

Таблиця 4. Параметри регулювання граничних станів за рівнем надійності СПЗК

Критичні граничні стани		Рівень надійності СПЗК	Параметри регулювання розрахункових ситуацій	Позначення параметра
група	вимоги безпеки			
Перша	Забезпечення несучої здатності	KI–KV	Конструктивна придатність	$1kc$
			Корозійне руйнування	$1kw$
			Живучість	$1kr$
Друга	Експлуатаційна придатність	ZI–ZIV	Довговічність	$2kd$
			Технологічна безпека	$2ks$
			Ремонтопридатність	$2km$

Сформульовані підходи до *of-line* та *on-line* контролю ВПКС застосовані на умовах функціонального і часового резервування корозійної захищеності, які викладено у працях [2–5] та апробовано відповідно до цілей розв'язання прямої та оберненої задач живучості конструкцій та споруд.

Результати та їх обговорення. Розроблений техніко-економічний механізм регулювання корозійної захищеності узагальнює індикаторне визначення ризиків зі застосуванням ризикознижувальних моделей (див. рис. 1b), що дає можливість забезпечувати прийнятний рівень технологічної безпеки промислових об'єктів.

Сформульована й обґрунтована загальна концепція інноваційного потенціалу корозійної захищеності як потрібного ресурсу для раціональних заходів первинного та вторинного захисту від корозії з урахуванням заданого рівня надійності СПЗК (див. рис. 1a) згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.6-193. Сутність ризик-орієнтованого підходу – оцінка якості та надійності з урахуванням КСКВ. У даному випадку КСКВ визначає розмір фінансових коштів, які визначають втрату показників якості і довговічності конструкцій і їх захисних покриттів. Тому основна функція корозійної захищеності – попередити економічні збитки від корозійного руйнування основних засобів. Необхідність використання збалансованих показ-

ників первинного та вторинного захисту пов'язана із впровадженням інтегральних критеріїв (індексів) під час визначення стратегії управління технологічною безпекою на основі методів ризик-аналізу.

Інжинірингова система критеріїв якості і надійності заходів захисту від корозії під час управління корозійною захищеністю містить інструменти *of-line* та *on-line* контролю ВПКС, які регламентовані стандартами підприємства або технічними вимогами (документованими процедурами) забезпечення якості проти-корозійного захисту сталевих конструкцій. Визначення циклів розвитку та рівня надійності СПЗК залежить від коефіцієнта готовності (K_g), який, по суті, є комплексним показником ремонтпридатності, що характеризує параметри конструктивної пристосованості заходів корозійної захищеності. Отримані дані використовували для розрахунку кваліметричних індексів (RR , IE) зі співвідношень (1) і (2) ВПКС. Таким чином, сформовані засади для часового та функціонального резервування СПЗК за вимогами критеріїв граничних станів (див. табл. 4). Питання з управління ризиками технологічної безпеки (див. табл. 2 і 3) вирішено на підставі методу HAZOP (Hazard and Operability Study).

ВИСНОВКИ

Розвинена стратегія ризик-орієнтованого управління (див. рис. 1) спрямована на комплексну техніко-економічну оцінку інноваційного потенціалу корозійної захищеності, відповідає сучасним інтегрованим методам поступового поліпшення концепції *Lean Six Sigma*, передбачає усунення втрат і непродуктивних витрат, підвищення характеристик якості, надійності і безпеки конструкцій та споруд. Кваліметричний підхід моніторингу і ризик-діагностики кородівних конструкцій поєднує переваги розрахункових моделей та алгоритмів регулювання граничних станів з умовами запровадження збалансованих індексів СПЗК під час проектування та відновлення засобів захисту від корозії промислових об'єктів.

1. *Похмурський В. І.* Розвиток досліджень у галузі корозії матеріалів в Україні. – Львів: ТзОВ “Простір-М”, 2010. – 44 с.
2. *Management of the quality of corrosion protection of structural steel based on corrosion risk level / V. Korolov, Yu. Filatov, N. Magunova, P. Korolov // J. of Mater. Sci. and Engng. A & B.* – 2013. – 3, №11. – P. 740–747.
3. *Gibalenko O., Korolov V., and Filatov Yu.* Design requirements to structural steel durability based on level of industrial facility corrosion hazard // *Aktualne problemy konstrukcij metalowych*, 27–28 listopada 2014. – Gdansk, Polska. – P. 98–102.
4. *Гібаленко О. М.* Методологічні підходи до забезпечення якості та надійності протикорозійного захисту будівельних металоконструкцій // *Промислове будівництво та інженерні споруди.* – 2016. – № 1. – С. 7–18.
5. *Королев П. В., Королев В. П., Куценко И. В.* Управление рисками коррозионной защищенности при решении прямой и обратной задач живучести стальных конструкций // *Вісник Одеськ. держ. академії будівництва та архітектури.* – 2016. – № 63. – С. 67–75.
6. *Корольов П. В.* Контролінг як функція управління корозійною захищеністю основних фондів промислових підприємств // *Вісник Приазовськ. держ. техніч. ун-ту. Сер.: Економічні науки.* – 2017. – Вип. 32. – С. 234–246.
7. *Корольов В. П., Риженков О. А., Корольов П. В.* Особливості регулювання протикорозійного захисту металоконструкцій промислових об'єктів // *Промислове будівництво та інженерні споруди.* – 2019. – № 3. – С. 18–24.
8. *Флейшман Б. С.* Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем. – Смоленск: Изд-во “Ойкумена”, 2008. – С. 228.
9. *Simon Herbert A.* Rational decision making in business organizations / Nobel Memorial Lecture // *American Economic Review.* – 1979. – 69(4). – P. 493–513.
10. *Gorochoy E. V. and Korolev V. P.* Durability of Steel Structures Under Reconstruction / A. A. Balkema Publishers. – Rotterdam, Brookfield, 1999. – 305 p.

Одержано 16.07.2020