

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДООЧИСТКИ — ПУТЬ К ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЮ

Старчак В. Г., Цыбуля С. Д., Иваненко К. Н., Буяльская Н. П., Костенко И. А.

IMPROVING WATER PURIFICATION EFFICIENCY AS A WAY TO ENVIRONMENTAL SAFETY AND RESOURCE SAVING

Starchak V. G., Tsybulia S. D., Ivanenko K. N., Buialska N. P., Kostenko I. A.

Аннотация

Введение: прогрессирующее техногенное загрязнение водоемов не только ухудшает качество воды, но и создает высокий уровень экологической опасности в связи с риском техногенных аварий на оборудовании водоочистки, водоотведения и водоснабжения, трубопроводах. Это требует разработки новых защитных композиций не только с высокой эффективностью водоочистки, особенно от тяжелых металлов, но и одновременно повышающих стойкость оборудования, трубопроводов к наиболее опасным коррозионно-механическим разрушениям (основной причине техногенных аварий). **Методы и материалы:** для разработки таких защитных композиций исследовали новые синергичные полифункциональные добавки, способные реагировать не только с загрязнителями воды, но и с поверхностными атомами металла. Оптимальную синергичную добавку определяли компьютерным моделированием. **Результаты:** предложена синергичная защитная композиция на вторичном сырье (с утилизацией региональных отходов). **Заключение:** предложенная синергичная защитная композиция при использовании в комплексной водоочистке позволяет обеспечить надежную эксплуатацию оборудования, трубопроводов, повысить экологическую безопасность водоемов.

Ключевые слова: водоочистка от тяжелых металлов, защитная композиция, повышение стойкости оборудования к коррозионно-механическому разрушению и техногенным авариям.

Введение

Анализ причин техногенных аварий на объектах водоснабжения, водоподготовки и водоочистки и канализационных системах показывает, что доминирующую роль в разрушениях играет коррозионный фактор. Проблема коррозионно-механического разрушения (усталость, растрескивание, водородная хрупкость и т. д.) — это не только проблема повышения эксплуатационной надежности, долговечности, экологической безопасности оборудования, трубопроводов водного хозяйства, но и проблема экологически сбалан-

Abstract

Introduction: the progressive technogenic pollution of water bodies not only worsens the quality of water, but also creates a high level of environmental hazard due to the risk of man-made accidents on water treatment equipment, water disposal and water supply, pipelines. This requires the development of new protective compositions, not only with high efficiency of water treatment, especially heavy metals, but at the same time increasing the resistance of equipment, pipelines to the most dangerous corrosion-mechanical disruptions (the main cause of man-made accidents). **Methods and materials:** to develop such protective compositions, new synergistic polyfunctional additives have been investigated capable of reacting not only with water pollutants but also with surface metal atoms. The optimal synergistic supplement was determined by computer simulation. **Results:** A synergistic protective composition on secondary raw materials was proposed (with utilization of regional wastes). **Conclusion:** the proposed synergistic protective composition when used in a complex water treatment allows to ensure reliable operation of equipment, pipelines, improve the ecological safety of water bodies.

Keywords: water treatment from heavy metals, protective composition, increase in equipment resistance to corrosion-mechanical destruction and technogenic accidents.

сированного использования природных ресурсов [1–5]. К числу важнейших из них, как одного из основных показателей технического потенциала страны, относятся металлоресурсы. Многие из них по показателю А (разведанные запасы/потребность) [6] — ограниченные, близкие к исчерпанию (1...5) и практически полностью исчерпанные (<1). Это может вызвать угрозу не только перспективам дальнейшего развития техники, но и экологическому равновесию в природе [2–4, 7–9].

Общий действующий металлофонд стран СНГ составляет 1600 млн т (промышленность —

750, транспорт — 400, сельское хозяйство — 150 и др.). Суммарная масса металла под землей (подземные трубопроводы и др.) только на территории России превышает 200 млн т, поверхность металла, подвергающаяся влиянию загрязненного грунта — 1,5 млрд м² [10]. Поэтому приобретает важное значение предотвращение большого эколого-экономического ущерба, в том числе компенсационных затрат по ликвидации последствий техногенных аварий, по разрушению природных ландшафтов, накоплению тяжелых металлов (ТМ) в водоемах, грунте (многие из них — стимуляторы коррозионных процессов), а также в растительном, животном мире и по трофическим путям — в организме человека [11, 12]. К тому же ряд ТМ — супертоксианты XXI века [13–16].

Цель работы — на основе установленных закономерностей, механизма действия тяжелых металлов разработать и оптимизировать состав синергичных защитных композиций на вторичном сырье для эффективной обработки сточных вод с минимизацией техногенного влияния ТМ на окружающую среду и повышения уровня экологической безопасности оборудования, трубопроводов водного хозяйства.

Методы и материалы

Разработана комплексная система экологического исследования и интегральной унифицированной оценки экодеструктивного техногенного влияния на окружающую среду, металлоконструкции водного хозяйства, с использованием химических, физико-химических методов анализа, спектрального анализа (ИК-, ПМР-, оже-спектроскопия, рентгеноспектральный анализ), комплексного корреляционного анализа, методов математической статистики, компьютерного моделирования, а также физико-механических испытаний сталей (сварных соединений) на выносливость в техногенно загрязненных природных (поверхностные воды — реки г. Чернигова: Десна, Стрижень, Белоус) и технологических средах (сточные воды и др.), четырех экологически опасных предприятий г. Чернигова: Черниговский завод радиоприборов (ЧеЗаРа), ЧП «Химволокно» (ЧХВ), Черниговский автозавод (ЧАД), Черниговская теплоэлектроцентраль (ЧТЭЦ). Исследования проведены за 6...10 ингредиентами с учетом содержания катионов, анионов тяжелых металлов и др. агрессивных загрязнителей [12, 17–19].

Для разработки защитных композиций исследовали новые синергичные полифункциональные добавки — потенциальные полидентатные хелатообразователи с несколькими реакционными (адсорбционными) центрами (эндо- и экзотомы N, S, O), способные реагировать не только с загрязнителями воды (ТМ), но и с поверхностными атомами металла трубопроводов, оборудования с образованием металлохелатных комплексов [12, 17–19]. Оптимальную синергичную добавку из шести групп исследованных гетероциклов (33 ГТЦ — производных имидазола, тиазола) определяли компьютерным моделированием — полуэмпирический метод MNDO-PM3, по электронным (q_N, q_S, q_O и др.) и термодинамическим характеристикам (DH_f, μ, E, I и др.) и корреляционным зависимостям защитных свойств от них: $Z, \beta, \gamma = f(q, I, DH_f)$ и др.

В составе защитных композиций использованы региональные отходы ЧХВ – К (600 т/год), Ровенского ХП «Азот» – КУБ (15 т/год), МП (2000 т/год) и др. К – кубовый отход первой дистилляции ϵ -Капролактама (ϵ -К) в цехе регенерации капролактама. «К» содержит олигомеры ϵ -К, амидные группы -NH-CO- и др. ϵ -К — производное азепиния, известного ингибитора коррозии; КУБ — кубовый остаток производства аммиака, стадия разгонки моноэтаноламина — МЭА (содержит 50 % МЭА); в МП (масло ПОД) действующей основой являются реакционно-способные ненасыщенные олигомеры циклогексанона с 4 π -связями ($M = 330...380$ г/моль). Защитная композиция содержала также активный полярный адсорбент — цеолит.

Уровень загрязненности речной, сточной воды определяли индексом загрязнения (ИЗВ) по Хильчевскому [20]; стойкость металла в речной, сточной воде — показателем K_{Π} (мм/год) [21]; выносливость — по показателю β_C^N [5, 12, 17–19] — влияние загрязненной среды на малоцикловую усталость стали (число циклов до разрушения на воздухе — N_B и в среде — N_C , $\beta_C^N = N_B/N_C$) и по десятибалльной шкале, разработанной нами [22], табл. 1.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики с использованием стандартной ошибки S (при $n = 6$, $t = 2,75$, и доверительной вероятности 0,95, она

Балльная оценка влияния ТЗ

1. Загрязненность воды							
Уровень ТЗ	Очень чистая	Чистая	Умеренно загрязненная	Загрязненная	Грязная	Очень грязная	Чрезвычайно грязная
ИЗВ	<0,3	0,3...1	1...2,5	2,5...4	4...6	6...10	>10
K_B , балл	1...2	3...4	5	6	7...8	9	10
2. Стойкость металла (ГОСТ 13819)							
Уровень стойкости	Целиком стойкие	Очень стойкие	Стойкие	Пониженно стойкие	Малостойкие	Нестойкие	
$K_{П^*}$ мм/год	<10 ⁻³	10 ⁻³ ...10 ⁻²	10 ⁻² ...10 ⁻¹	10 ⁻¹ ...1.0	1,0...10	>10	
K_{KM} , балл	1	2...3	4...5	6...7	8...9	10	
3. Выносливость							
Уровень выносливости	Допустимый	Умеренно-допустимый	Напряженный	Опасный	Чрезвычайно опасный		
$\beta_{С^N}/\beta_{СН^N}$	<1/1,1...1.3	1...1,2/1,3...2.5	1,2...2,0/2,5...3,5	2...3/3,5...4,5	$\geq 3/\geq 4,5$		
$K_{MЦВ}$, балл	1...2	3...4	5...6	7...8	9...10		

* $\beta_{С^N}$ — в коррозионной среде (рН 7), $\beta_{СН^N}$ — в коррозионно-наводороживающей (рН<7).

составляла: $S = \pm 5...10$ %). Определяли также коэффициент корреляции r регрессионным анализом (метод наименьших квадратов). Маловероятные данные отбрасывали с использованием Q-критерия [23].

Результаты экспериментов представлены на рис. 1, 2 и в табл. 2, 3. Анализ данных табл. 2 показал, что вода в р. Десне за ИЗВ — умеренно загрязненная, в р. Стрижень — загрязненная, а в р. Белоус — грязная. Сточные воды ЧРПЗ, ЧХВ соответствовали $K_B=7$ и 9 (грязная и очень грязная), ЧАД, ЧТЭЦ — 10 (чрезвычайно грязная).

Наблюдаются четкие корреляционные зависимости $K_{П^*}$, $\beta_{С^N} = f(\text{ИЗВ})$ и K_{KM} , $K_{MЦВ} = f(\text{ИЗВ})$ — рис. 1. В соответствии с ГОСТ 13819 группа стойкости металла (сталь 20) в речной, сточной воде повышается от 3 (стойкие) до 6 (нестойкие) при увеличении техногенного загрязнения, увеличивается и коэффициент влияния среды $\beta_{С^N}$ на малоцикловую усталость от 2 до 3,5, что соответствует (табл. 1) уровню выносливости от напряженного до чрезвычайно опасного ($K_{MЦВ} = 6...10$).

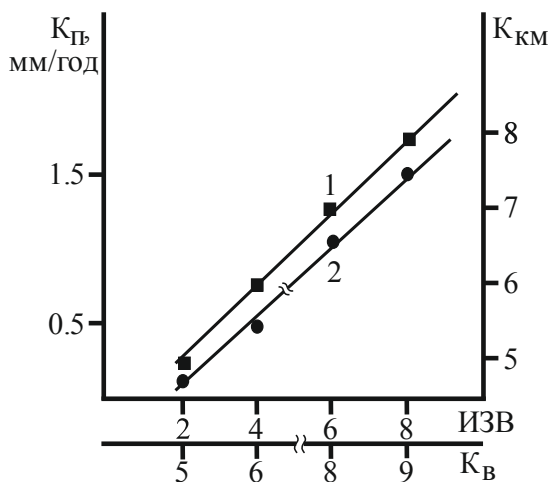


Рис. 1. Корреляционные зависимости 1 — $K_{KM} = f(K_B)$, $K_{KM} = 0,67 \cdot K_B + 2,0$; 2 — $K_{П^*} = f(\text{ИЗВ})$, $K_{П^*} = 0,23 \cdot \text{ИЗВ} - 0,33$

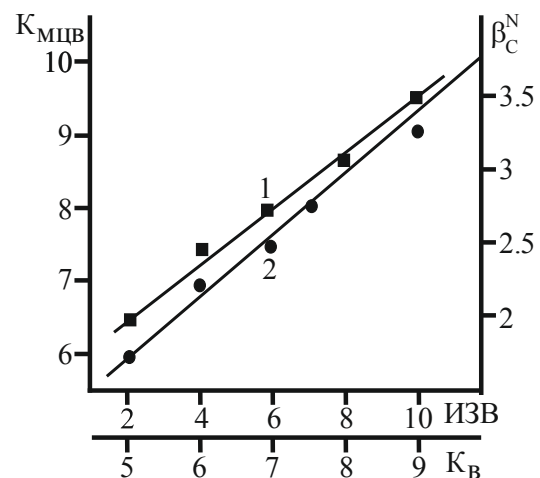


Рис. 2. Корреляционные зависимости 1 — $\beta_{СН^N} = f(\text{ИЗВ})$, $\beta_{СН^N} = 0,188 \cdot \text{ИЗВ} + 1,625$; 2 — $K_{MЦВ} = f(K_B)$, $K_{MЦВ} = 0,8 \cdot K_B + 2,0$.

Показатели ИЗВ сточной воды

Проба СВ	ИЗВ/ K_B		Класс опасности		Характеристика воды		γ_T
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	
1. ЧеЗаРа	5,55/7	2,22/5	V	III	Грязная	Умеренно загрязненная	2,5
2. ЧХВ	7,12/9	2,75/6	VI	IV	Очень грязная	Загрязненная	2,6
3. ЧАД	11,10/10	3,58/6	VII	IV	Чрезвычайно грязная	Загрязненная	3,1
4. ЧТЕЦ	14,24/10	3,95/6	VII	IV	Чрезвычайно грязная	Загрязненная	3,6

^{x/} *a* — исходное значение, *b* — с защитой СЗК, 4 г/дм³ (КУБ:МП, с СД, 1 мМ/дм³, 2 г/дм³ цеолита), рН 5,0...5,4 (слабокислые СВ) — коррозионно-наводороживающие среды; ИЗВ определяли (по 10 ингредиентам: Pb, Ni, Cr, Zn, Cu, SO₄²⁻, Cl⁻, O₂, БПК₅) в сертифицированной лаборатории госэкоинспекции г. Чернигова; γ_T — показатель технологической эффективности очистки воды от ТМ ($\gamma_T = a/b$).

Из табл. 2 видно, что загрязненность сточных вод ЧТЕЦ тяжелыми металлами возрастает в 2,6 раза, по сравнению с сточными водами ЧеЗаРа. Обработка сточных вод синергичной защитной композицией снижает загрязненность сточных вод тяжелыми металлами, обеспечивая технологическую эффективность: $\gamma_T = 2,5$ (ЧеЗаРа); 2,6 (ЧХВ); 3,1 (ЧАД), 3,6 (ЧТЭЦ). Загрязненность снижается на 2...4 класса. ИЗВ уменьшается за счет металлохелатирования, образования нерастворимых металлохелатных комплексов и их адсорбции, а также ионного обмена свободных катионов тяжелых металлов на активном полярном абсорбенте — цеолите.

Техногенное загрязнение сточных вод тяжелыми металлами заметно влияет на показатели малоциклового усталости (машина ИП-2 [24]): показатель влияния среды β_{CH}^N увеличивается в 2,6 раза с повышением ИЗВ в СВ от V класса до VII (табл. 3).

Как видно из табл. 3, СЗК снижает влияние среды в 1,9...2,8 раз по (β_{CH}^N) и повышает выносливость, за $K_{MЦВ}$, на 3–6 баллов. Это, прежде всего, связано с уменьшением содержания тяжелых

металлов — активных стимуляторов процессов разрушения конструкций. Однако немаловажную роль играет образование на поверхности стали стойкой защитной наномасштабной металлохелатной пленки (K_{st} металлохелатов $10^{15}...10^{20}$). Синергизм СД в СЗК усиливает ее образование, так как он способствует внутримолекулярным водородным связям. Это увеличивает положительный заряд на пиррольном атоме азота имидазольного ядра (N_1), повышает его электрофильность и перенос заряда с *d*-уровней Fe на лиганд ($Me \xrightarrow{\bar{e}} L$), с образованием р-дативных связей и активизацией металлохелатирования. Синергизму способствует индуктивное, мезомерное и резонансное взаимодействие полярных групп СД с реакционными центрами. Это находит подтверждение также по теории ЖМКО (жестких, мягких кислот-оснований) [25]: за счет взаимодействия мягкого акцептора (поверхностные атомы железа) с «мягким» донором (имидазольным кольцом).

Заключение

Использование СЗК в комплексной водоочистке с применением химических (металлохелатирование), физико-химических методов очистки

Коэффициенты влияния среды (СВ) — β_{CH}^N на малоцикловую усталость стали 20 (степень деформации $\epsilon = 0,3\%$) и $K_{MЦВ}$

Проба СВ	β_{CH}^N		$K_{MЦВ}$		Уровень выносливости		γ_T	$\gamma_{син}$
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>		
1	2,12	1,12	4	1	Умеренно допустимый	Допустимый	1,9	1,5
2	3,01	1,28	5	2	Напряженный	Допустимый	2,3	1,7
3	4,20	1,60	7	3	Опасный	Умеренно допустимый	2,6	1,9
4	5,61	2,00	10	4	Чрезвычайно опасный	Умеренно допустимый	2,8	2,1

^{x/} $\gamma_{син} = (\Sigma\beta_i - (n - 1))/\beta_{\Sigma}$, *a*, *b* — по табл. 2

сточных вод (адсорбция, ионный обмен) позволяет обеспечить надежную эксплуатацию оборудования, трубопроводов, повысить экологическую безопасность водоемов относительно тяжелых металлов, а также модификацией поверхности стали увеличить выносимость технических сооружений водоочистки, с предотвращением техногенных аварий и экономией металлоресурсов.

Литература

1. Данилов-Данильян, В. И. (ред.) (1997). *Экология, охрана природы и экологическая безопасность*. М.: Наука, 424 с.
2. Реймерс, Н. Ф. (1990). *Природопользование*. М.: Наука, 634 с.
3. Ваганов, П. А. (2002). *Человек. Риск. Безопасность*. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 160 с.
4. Орлов, Д. С., Садовникова, Л. К., Лозановская, И. Н. (2002). *Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении*. М.: Высшая школа, 334 с.
5. Походня, И. К. (ред.) (1998). *Сучасне матеріалознавство XXI ст.* Киев: Наукова думка, 658 с.
6. Шлугер, М. А., Ажогин, Ф. Ф., Ефимов, Е. А. (1995). *Коррозия и защита металлов*. М.: Metallurgiya, 216 с.
7. Старчак, В. Г. (1992). Влияние коррозионной ситуации на состояние экосистем. *Монтажные и спецработы в строительстве*, № 10, сс. 11–12.
8. Козьменко, С. Н. (1997). *Экономика катастроф*. Киев: Наукова думка, 203 с.
9. Белов, С. В. (2006). *Охрана окружающей среды*. М.: ИНФРА, 425 с.
10. Сидоренко, С. Н., Черных, Н. А. (2002). *Коррозия металлов и вопросы экологической безопасности магистральных трубопроводов*. М.: РУДН, 83 с.
11. Мельник, Л. Г. (2002). *Екологічна економіка*. Суми: Університет. книга, 346 с.
12. Старчак, В. Г., Цибуля, С. Д., Буяльская, Н. П. (2012). Вплив екологічної ситуації на протикорозійний захист металоконструкцій. *Фіз.-хім. механіка матер.*, спецвип. № 9, т. 2, сс. 767–772.
13. Давыдова, С. Л., Тагасов, В. И. (2002). *Тяжелые металлы как супертоксиканты XXI века*. М.: РУДН, 140 с.
14. Стадницкий, Г. В., Родионов, А. И. (1998). *Экология*. М.: Высшая школа, 298 с.
15. Корте, Ф. (1997). *Экологическая химия*. М.: Мир, 188 с.
16. Головкин, А. И., Куценко, С. А. (1999). *Экотоксикология*. М.: НИИХВ СПбГУ, 452 с.
17. Цибуля, С. Д. (2004). Запобігання техногенних аварій підвищенням корозійної тривалості металоконструкцій. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*, № 4, сс. 35–41.
18. Старчак, В. Г., Буяльская, Н. П., Цибуля, С. Д. (2004). Наукові основи підвищення екологічної безпеки металоконструкцій у протикорозійному захисті. *Фіз.-хім. механіка матер.*, спецвип. № 4, т. 2, сс. 853–859.
19. Старчак, В. Г., Алексеенко, С. А., Буяльская, Н. П. (2008). Роль гетероатомов в образовании металлохелатных

наноструктур при поверхностной модификации материалов. *Наноструктурное материаловедение*, № 2–4, сс. 70–84.

20. Хільчевський, В. К. (1999). Водопостачання та водовідведення. *Гідрологічні аспекти*. Киев: КДУ, 319 с.

21. Жук, Н. П. (2006). *Курс теории коррозии и защиты металлов*. М.: Альянс, 472 с.

22. Старчак, В. Г., Мачульський, Г. М., Цибуля, С. Д., Мачульський, О. М. (2014). Оцінка техногенного впливу на екологічну безпеку техноприродних систем. *Стандартизація. Сертифікація. Якість*, № 3(88), сс. 53–58.

23. Гордон, А., Форд, Р. (1986). *Спутник химика*. М.: Мир, 543 с.

24. Бабей, Ю. И., Сопрунюк, Н. Г. (1991). *Защита стали от коррозионно-механических разрушений*. Киев: Техника, 126 с.

25. Walters, F. H. (1991). Design of Corrosion inhibitors use the Hard and Soft Acid-Base (HSAB) Theory. *Chemical Education*, vol. 68, № 1, pp. 29–31.

References

1. Danilov-Danil'yan, V. I. (ed.) (1997). *Ekologiya, ohrana pryrody i ehkologicheskaya bezopasnost'* [Ecology, nature conservation and environmental security]. M.: Nauka, 424 p. (in Russian).
2. Rejmerns, N. F. (1990). *Prirodopol'zovanie* [Management of natural resources]. M.: Nauka, 634 p. (in Russian).
3. Vaganov, P. A. (2002). *Chelovek. Risk. Bezopasnost'* [Man. Risk. Safety]. SPb: Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo universiteta, 160 p. (in Russian).
4. Orlov, D. S., Sadovnikova, L. K., Lozanovskaya, I. N. (2002). *Ekologiya i ohrana biosfery pri himicheskoy zagryaznenii* [Ecology and biosphere protection in case of chemical contamination]. M.: Vysshaya shkola, 334 p. (in Russian).
5. Pohodnya, I. K. (ed.) (1998). *Suchasne materialoznavstvo XXI st.* [Contemporary material sciences of XXI century]. Kiev: Naukova dumka, 658 p. (in Ukrainian).
6. Shluger, M. A., Azhogin, F. F., Efimov, E. A. (1995). *Korroziya i zashchita metallov* [Corrosion and materials protection]. M.: Metallurgiya, 216 p. (in Russian).
7. Starchak, V. G. (1992). Vliyanie korrozionnoy situacii na sostoyanie ehkosisistem [Impact of corrosive situation on the state of ecological systems]. *Montazhnye i specraboty v stroitel'stve*, № 10, pp. 11–12. (in Russian).
8. Koz'menko, S. N. (1997). *Ekonomika katastrof* [Economy of disasters]. Kiev: Naukova dumka, 203 p. (in Russian).
9. Belov, S. V. (2006). *Ohrana okruzhayushchej sredy* [Protection of environment]. M.: INFRA, 425 p. (in Russian).
10. Sidorenko, S. N., Chernyh, N. A. (2002). *Korroziya metallov i voprosy ehkologicheskoy bezopasnosti magistral'nyh truboprovodov* [Corrosion of metals and problems of environmental safety of trunk pipelines]. M.: RUDN, 83 p. (in Russian).
11. Mel'nik, L. G. (2002). *Ekologichna ekonomika* [Economic ecology]. Sumi: Universitet. kniga, 346 p. (in Ukrainian).
12. Starchak, V. G., Tsybulia, S. D., Buial'ska, N. P. (2012). Vpliv ekologichnoy situacii na protikoroziynij zahist metalokonstrucij [Impact of environmental situation on anticorrosion protection of metal structures]. *Fiz.-him. mekhanika mater.*, № 9, t. 2, pp. 767–772. (in Ukrainian).

13. Davydova, S. L., Tagasov, V. I. (2002). *Tyazhelye metally kak supertoksikanty XXI veka* [Heavy metals as supertoxicants of XXI century]. M.: RUDN, 140 p. (in Russian).

14. Stadnickij, G. V., Rodionov, A. I. (1998). *Ekologiya* [Ecology]. M.: Vysshaya shkola, 298 p. (in Russian).

15. Korte, F. (1997). *Ekologicheskaya himiya* [Ecological chemistry]. M.: Mir, 188 p. (in Russian).

16. Golovko, A. I., Kucenko, S. A. (1999). *Ekotoksikologiya* [Ecotoxicology]. M.: NIIHV SPbGU, 452 p. (in Russian).

17. Tsybulia, S. D. (2004). Zapobigannya tekhnogennih avarij pidvishchennyam korozijnõi trivkosti metalokonstrukcij [Prevention of man-induced accidents through increasing corrosive resistance of metal structures]. *Ekologiya dovkillya ta bezpeka zhittediyal'nosti*, № 4, pp. 35–41. (in Ukrainian).

18. Starchak, V. G., Buialska, N. P., Tsybulia, S. D. (2004). Naukovi osnovi pidvishchennya ekologichnoï bezpeki metalokonstrukcij u protikorozijnomu zahisti [Science behind enhancing environmental safety of metal structures in anticorrosion protection]. *Fiz.-him. mekhanika mater.*, specvip. № 4, t. 2, pp. 853–859. (in Ukrainian).

19. Starchak, V. G., Alekseenko, S. A., Buialska, N. P. (2008). Rol' geteroatomov v obrazovanii metallohelatnyh nanostruktur pri poverhnostnoj modifikacii materialov [Role of heteroatoms in formation of metalchelating nanostructures in case of surface modification of materials]. *Nanostrukturnoe materialovedenie*, № 2–4, pp. 70–84. (in Ukrainian).

20. Hil'chevs'kij, V. K. (1999). *Vodopostachannya ta vodovidvedennya. Hidrologichni aspekti* [Water supply and water removal. Hydrological aspects]. Kiev: KDU, 319 p. (in Ukrainian).

21. Zhuk, N. P. (2006). *Kurs teorii korrozii i zashchity metallov* [Course in the theory of corrosion and protection of metals]. M.: Al'yans, 472 p. (in Russian).

22. Starchak, V. G., Machul's'kij, G. M., Tsybulia, S. D., Machul's'kij, O. M. (2014). Ocinka tekhnogennogo vplivu na ekologichnu bezpeku tekhnoprirodnih system [Estimation of man-induced impact on environmental security of technical natural systems]. *Standartizaciya. Sertifikaciya. Yakist'*, № 3(88), pp. 53–58. (in Ukrainian).

23. Gordon, A., Ford, R. (1986). *Sputnik himika* [Chemist's guide]. M.: Mir, 543 p. (in Russian).

24. Babej, Yu. I., Soprunyuk, N. G. (1991). *Zashchita stali ot korrozionno-mekhanicheskikh razrushenij* [Steel protection against stress-corrosion fractures]. Kiev: Tekhnika, 126 p. (in Russian).

25. Walters, F. H. (1991). Design of Corrosion inhibitors use the Hard and Soft Acid-Base (HSAB) Theory. *Chemical Education*, vol. 68, № 1, pp. 29–31.

Авторы

Старчак Валентина Георгиевна, д-р техн. наук, профессор

Черниговский национальный педагогический университет
E-mail: vgstarchak@gmail.com

Цыбуля Сергей Дмитриевич, д-р техн. наук, доцент
Черниговский национальный технологический университет

E-mail: stcibula@gmail.com

Иваненко Константин Николаевич, канд. техн. наук
Черниговский национальный технологический университет

E-mail: kostya_ivanenko@mail.ru

Буяльская Наталья Павловна, канд. техн. наук, доцент

Черниговский национальный технологический университет

E-mail: buialska@gmail.com

Костенко Игорь Андреевич, канд. техн. наук, доцент
Черниговский национальный технологический университет

E-mail: atdrj@ukr.net

Authors

Starchak Valentina Georgievna, Dr. of Engineering, professor

Chernihiv National T. G. Shevchenko Pedagogical University

E-mail: vgstarchak@gmail.com

Tsybulia Sergej Dmitrievich, Dr. of Engineering
Chernihiv National University of Technology

E-mail: stcibula@gmail.com

Ivanenko Konstantin Nikolaevich, PhD in Engineering
Chernihiv National University of Technology

E-mail: kostya_ivanenko@mail.ru

Buialska Nataliia Pavlovna, PhD in Engineering
Chernihiv National University of Technology

E-mail: buialska@gmail.com

Kostenko Igor' Andreevich, PhD in Engineering
Chernihiv National University of Technology

E-mail: atdrj@ukr.net