

**С. Д. Цибуля, В. Г. Старчак, К. М. Іваненко**

## **ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В СУЧАСНОМУ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ ТРУБОПРОВІДНОГО ТРАНСПОРТУ ТА ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ**

*В роботі розглянуто екологічні проблеми сучасного матеріалознавства, що пов'язані з тривалою (декілька десятиліть) роботою конструкційних матеріалів інженерних споруд, зокрема трубопровідного транспорту, у екстремальних умовах техногенного інгредієнтного (особливо за наявністю важких металів) та енергетичного впливу (електромагнітні поля, вібрація, радіація та ін.), з тенденцією його підсилення в найближчій перспективі. Це обумовлює інтенсифікацію корозійно-механічного руйнування, техногенних аварій на наземному, підземному та підводному трубопровідному транспорті. Запропоновано уніфіковану комплексну інтегральну бальну оцінку техногенного впливу, за сумарним показником екологічної небезпеки  $I_n$  щодо конструкційних матеріалів. Вона дозволяє своєчасно попередити ризик техногенних аварій, руйнацію трубопровідного транспорту, із застосуванням технологічних, металургійних методів та інноваційних технологій.*

**Ключові слова:** техногенний вплив, екологічна небезпека, інгредієнтне, енергетичне забруднення, трубопровідний транспорт, інноваційні технології захисту конструкційних матеріалів.

### **Вступ**

Трубопровідний транспорт (ТРТ) України на сьогодні є одним з найбільших надбань держави, стрижнем нафтогазового комплексу країни, гарантом її енергетичної безпеки, з надзвичайно важливою роллю газотранспортної системи в економіці України [1]. Основний показник ефективності роботи ТРТ — рівень експлуатаційної надійності та техногенно-екологічної безпеки, з відсутністю техногенних аварій [2-5]. Ризик техногенних аварій із забрудненням поверхневих, морських вод, повітря, ґрунту важкими металами (ВМ) та деградація земель внаслідок їх накопичення, відходів, що відносяться за даними ООН до найбільш загрозливих екологічних проблем глобального рівня [3]. Екологічна небезпека конструкційних матеріалів ТРТ здебільшого формується екологічною ситуацією [4, 5]. В основі її лежать екодеструктивні явища: поверхневі (корозія), об'ємні (наводнювання), що обумовлюють небезпечні корозійно-механічні руйнування (КМР): корозійне розтріскування (КР), малоциклову корозійну та водневу втому (МЦКВ, МЦВВ) та водневу деградацію (ВД) [6-8]. Саме вони є у 80% випадків основною причиною техногенних аварій, екологічної небезпеки ТРТ. В результаті виникають великі еколого-економічні збитки за рахунок втраченого цільового продукту (газ, нафта та ін.), а також недовиробленого та компенсаційних втрат по ліквідації наслідків техногенних аварій [2, 9].

---

© Цибуля Сергій Дмитрович, декан екологічного факультету Чернігівського національного технологічного університету; Старчак Валентина Григорівна, завідувачка кафедри цього ж університету; Іваненко К. М. — співробітник цього ж університету.

Практично всі магістральні, промислові, технологічні трубопроводи, продуктопроводи, водогінні та теплові мережі працюють у корозійно-активних середовищах, які негативно впливають на технічний стан металокопункцій та екологічну безпеку. Найбільші екологічні проблеми виникають на підприємствах нафтогазового комплексу (НГК) [10, 11]. Особливу екологічну небезпеку мають чисельні переходи (їх декілька тисяч) трубопроводів через природні, штучні перепони (річки, водосховища, моря, залізниці, автошляхи). У 80% випадків усіх аварій на НГК виникають газонафтові фонтани (при поривах трубопроводів), які поряд з пожежами і вибухами, призводять до найбільш тяжких наслідків для довкілля: при одному пориві нафтопроводу викид нафти складає 2 т, що порушує екостан 1000 м<sup>3</sup> ґрунту. Ґрунт насичується «нафтовими металами» (V, Ni, Cr, Cd, Cu, Pb, Zn тощо), які вважаються супертоксикантами ХХІ ст. [9–12]. Це питання гостро стоїть в Україні, як транзитної держави [1]: 12 основних нафтопроводів, протяжністю 3 тис. км, газотранспортна система — до 40 тис. км, продуктопроводи — 3,3 тис. км. [1, 13]. По території Чернігівської обл. проходять 440 км нафто- та продуктопроводів (248 км — з понаднормативним строком експлуатації), з 48 переходами (через водні перешкоди — 7, залізниці — 7, автомобільні шляхи (1–4 категорії), 387 км магістральних газопроводів) [14].

Аналіз причин аварійних відмов інженерних споруд свідчить про домінуючий вплив корозійного фактору: у нафтовидобутку та транспорті нафти — 70%, на промислових трубопроводах нафти, води, газу — у 95%. Втрати від корозії складають 12–15% металофонду (більше 1/3 припадає на ПЕК), а в індустріально розвинутих країнах перевищують 4% національного доходу. Особливо потерпають від корозії зварні металокопункції, що складають до 70% загального металофонду [6–11] (наземні, підземні, підводні трубопроводи, що працюють в забрудненому важкими металами середовищі).

На відміну від багатьох токсикантів, важким металам не властиві процеси самоочищення, притаманна велика токсичність, рухомість та стійкість у навколишньому середовищі. Їх токсичність та негативна дія на металокопункції залежить від багатьох факторів: хімічної та біологічної активності, елементарних реакцій на міжфазових границях, утворення вільних радикалів, масопереносу речовини та її розподілу у біотичних, абіотичних компонентах, молекулярних та іонних процесів, що відбуваються з речовинами в техноприродних екосистемах, з утворенням первинних, вторинних токсикантів, а також за участю важких металів та їх сполук в реакціях осадження, протолітичних, редоксиметричних, комплексоутворюючих, що обумовлює також можливе первинне, вторинне інгібування металокопункцій [2–5, 9, 12–15]. Ситуація загострюється ще й тим, що більшість ВМ — стимулятори анодних, катодних реакцій корозії, корозійно-механічного руйнування (КР, МЦКВ, МЦВВ), що активізуються дією енергетичного забруднення (електромагнітні поля — ЕМП, іонізуючі випромінювання — ІВ та ін.) [16–19].

Критичний аналіз теорії та практики попередження техногенного впливу на конструкційні матеріали технічних споруд в техноприродних системах (ТПС) показав:

- особливу небезпеку техногенного забруднення (ТЗ) довкілля важкими металами, завдяки їх активній участі в багатьох хімічних, фізико-хімічних та біологічних процесах;
- обмеженість наукових даних про кореляційні залежності між ТЗ та його впливом на конструкційні матеріали;

## II. Результати наукових досліджень

- необхідність введення в інтегральну оцінку екостану ТПС, крім сумарних коефіцієнтів небезпеки забруднення повітря, води, ґрунту, рослин, показників тривкості, витривалості конструкційних матеріалів, характеристик експлуатаційної надійності технічних споруд, в умовах техногенного інгредієнтного та енергетичного забруднення, для запобігання техногенних аварій та екологічних катастроф;
- нагальність розробки комплексних технічних засобів захисту довкілля та підвищення техногенно-екологічної безпеки конструкційних матеріалів інженерних споруд, що працюють в умовах техногенного забруднення природних та технологічних середовищ.

### Мета роботи

Визначити інтегральну оцінку техногенного впливу забруднення атмосферного повітря, водойм (поверхневих вод), ґрунту важкими металами та енергетичного забруднення (ЕМП, ІВ, вібрація) на тривкість, витривалість конструкційних матеріалів ТРТ й встановити кореляційні залежності між інтегральними показниками ТЗ, небезпекою експлуатації ТРТ та її зниження запропонованими технологічними та організаційно-технічними методами інноваційних технологій захисту конструкційних матеріалів.

### Методичні аспекти

В роботі застосовані хімічні, фізичні, фізико-хімічні методи аналізу техногенного забруднення та фізико-механічні випробування його впливу на конструкційні матеріали, за стандартними методиками [5–8, 16–23]. Досліджували техногенний вплив на конструкційні матеріали ТРТ: вуглецеві сталі (сталі 3, 10кп, 20, 45), низьколеговані (10Г2ФР, 10ХСНД, 16ГНМА, 30ХГСНА, 38ХС, 40Х, різних плавок – М, ЕД, ВДП, ЕШП та ін.; 09ХГ2НАБЧ, зварні з'єднання сталей 09Г2ФБ, 15Г2АФЮ, 16ГФР, 17Г1С), високолеговані (Х12М, Х17Н2, 12Х18Н10Т), сталі програмного забруднення певними (на 80–90%) неметалевими включеннями — НМВ (сталь 20, з оксидними (О), сульфідними (С), нітридними (Н) неметалевими включеннями (НМВ) та пластичними силікатами (ПС)) й сталь 12Х18Н10Т, з О, Н, С – НМВ, а також АІ-, Ті-сплави, БАК. Забруднені середовища: природні (поверхневі води, рр. Десна, Стрижень, Білоус; ґрунт) та технологічні з різним рН (корозійні, корозійно-наводнювальні та наводнювальні, з катодною поляризацією  $i_k = 0,05 \dots 0,1$  А/см<sup>2</sup>) [5, 24–27, 40]. В роботі використано розроблені моделі: екостану ТПС, екобезпеки інженерних споруд, з удосконаленням методів підвищення експлуатаційної та екологічної надійності споруд та збільшення дієвості контролю засобів захисту довкілля за інтегральними показниками технічної, екологічної та економічної ефективності [17]. В розвиток наукових робіт [23, 28], де автори розглядають вплив техногенного забруднення на екологічну безпеку ТПС і наводять показник екологічної небезпеки  $I_H$  на основі 4х інгредієнтних складових, проведено уніфікацію інтегральної оцінки техногенного впливу на конструкційні матеріали, з врахуванням інгредієнтного та енергетичного забруднення за 10 сумарними показниками небезпеки в баллах, що складають інтегральний показник небезпеки —  $I_H$ :

1. Атмосферного повітря –  $K_a$  (за ІЗА — індексом забруднення атмосфери [2, 3, 23, 29–34]):

$ІЗА = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{C_i}{ГДК_{с.д.i}} \right)^{a_i}}{n}$	(1)
---	-----

$C_i, ГДК_{с.д.i}$  — фактична та гранично-допустима концентрація ТЗ, мг/м<sup>3</sup> (с.д. — середньодобова),

$a_i$  — показник токсичності (за класом небезпеки ТЗ),  $n$  — число забруднюючих речовин.

2. Ґрунту –  $K_Г$  (за  $Z_С$  — сумарним показником забруднення важкими металами [35]):

$Z_С = \sum_{i=1}^n K_{ci} - (n - 1)$	(2)	$K_{ci} = \frac{C_{факт.i}}{C_{фон.i}}$	(3)
---------------------------------------	-----	---	-----

$K_{ci}$  — коефіцієнт концентрації ВМ в ґрунті.

3. Водойм –  $K_В$  (за ІЗВ — індексом забруднення води [2, 12, 15–17, 23, 36, 37])

$ІЗВ = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{C_i}{ГДК_{р.г.i}} \right)}{n}$	(4)
---	-----

$C_i, ГДК_{р.г.i}$  — фактична та гранично-допустима концентрація ТЗ, мг/дм<sup>3</sup> (р.г. — рибогосподарська),

4. Акумуляції ТЗ рослинністю –  $K_Р$  (за  $K_{ac}$  [2, 3, 12–17, 23]).

5. Небезпеки здоров’я людини –  $K_З$  (за ступенем ризику [12–15, 29, 31–33]).

6. Тривкості конструкційних матеріалів (КМ) в забрудненому ВМ середовищі –  $K_{KM}$  (за групами тривкості 1...6 та 10-бальною шкалою,  $K_{II}$ , мм/рік [5, 23, 38]).

7. Витривалості конструкційних матеріалів (за показниками техногенного впливу на малоциклову втому (МЦВ) — основну причину техногенних аварій металоконструкцій —  $K_{МЦВ}$  (за  $\beta_C^N$  або  $\beta_H^N$ ) [5-8, 16–18, 24–27]

$\beta_C^N = N_{II}/N_C$	(5)	$\beta_H^N = N_{II}/N_H$	(6)
--------------------------	-----	--------------------------	-----

$\beta_C^N, \beta_H^N$  — коефіцієнти впливу корозійного та наводнювального середовищ,  $N_{II}, N_C, N_H$  — число циклів до руйнування на повітрі, у корозійному та наводнювальному середовищах, в умовах техногенного впливу.

8. Електромагнітні поля (ЕМП) –  $K_{ЕМП}$  [19, 39], з врахуванням напруженості електричного (Е), магнітного (Н) поля та густини потоку енергії ( $\sigma$ ).

9. Акустичного забруднення – вібрації –  $K_V$  [20, 39], в частках від  $L_{V,доп}$ .

10. Радіоактивного забруднення (РЗ) –  $K_{РЗ}$  [20, 39], в частках питомої активності  $A_{доп}$  (табл. 1, 2).

## Уніфікована балльна оцінка впливу ТЗ на ППС з трубопровідним транспортом

Складові інтегрального показника безпеки $I_H$							
1. Атмосферне повітря – $K_a$							
Рівень ТЗ	Допустимий	Середній	Високий	Дуже високий	Надзвичайно високий		
Балл	1–2	3–5	6–8	9	10		
ІЗА	<100	100...200	200...450	450...800	>800		
2. Грунт – $K_g$							
Рівень ТЗ	Допустиме	Помірно-допустиме	Небезпечне	Надзвичайно-небезпечне			
Балл	1–3	4–6	7–9	10			
$Z_c$	<16	16...32	32...128	>128			
3. Водойми – $K_v$							
Рівень ТЗ	Дуже чиста	Чиста	Помірно забруднена	Забруднена	Брудна	Дуже брудна	Надзвичайно брудна
Балл	1–2	3–4	5	6	7–8	9	10
ІЗВ	<0,3	0,3...1	1...2,5	2,5...4	4...6	6...10	>10
4. Рослинність – $K_r$							
Рівень ТЗ	Допустиме	Помірно-допустиме	Небезпечне	Надзвичайно-небезпечне			
Балл	1–3	4–6	7–9	10			
$K_{ac}$	1,1...1,5	1,5...3,5	3,5...5	>5			
5. Здоров'я населення (ризик) – $K_z$							
Рівень ризику	Малий	Середній	Високий	Дуже високий			
Балл	1–3	4–5	6–8	9–10			
Ризик	<10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup> ...10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup> ...10 <sup>-2</sup>	>10 <sup>-2</sup>			
6. Тривкість конструкційного матеріалу – $K_{KM}$							
Рівень тривкості	Цілком тривкі	Дуже тривкі	Тривкі	Понижено тривкі	Малотривкі	Нетривкі	
Балл	1	2–3	4–5	6–7	8–9	10	
$K_{TP}$ , мм/рік	<10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup> ...10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup> ...10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup> ...1,0	1,0...10	>10	
7. Витривалість КМ – $K_{MVB}$							
Рівень витривалості	Допустимий	Помірно-допустимий	Напружений	Небезпечний	Надзвичайно небезпечний		
Балл	1–2	3–4	5–6	7–8	9–10		
$\beta_C^N / \beta_H^N$	$\leq 1/1, 1...1, 5$	1...1,2/1,5...3	1,2...2/3...4	2...3/4...5	$\geq 3/\geq 5$		
8. ЕМП – $K_{EMP}$							
Рівень ЕМП	Допустимий	Помірно-допустимий	Напружений	Небезпечний	Надзвичайно-небезпечний		
Балл	1–2	3–4	5–6	7–8	9–10		
H, А/м	3–5	5–6	6–8	8–9	$\geq 10$		

Продовження таблиці 1.

9. Вібрація – $K_v$					
Рівень вібрації	Допустимий	Помірно-допустимий	Напружений	Небезпечний	Надзвичайно-небезпечний
Балл	1–2	3–4	5–7	8–9	10
$L_v$ , дБ	80...95	95...120	120...125	125...130	>130
10. Радіація – $K_{p3}$					
Рівень p3	Дуже низький	Низький	Помірний	Допустимий	Небезпечний
Балл	1–2	3–4	5–7	8–9	10
A, Ки/км <sup>2</sup> (Cs/Sr)	0,1...0,2/ 0,01...0,05	0,2...1/ 0,05...0,15	1...5/ 0,15...1	5...15/ 1...3	>15/>3

### Результати експериментів та їх обговорення

Визначення інтегральної комплексної оцінки екобезпеки ТПС з ТРТ здійснювали за  $I_H$  (табл. 2):

$$I_H = K_a + K_r + K_v + K_p + K_z + K_{km} + K_{MЦВ} + K_{EMП} + K_v + K_{p3} \quad (7)$$

Таблиця 2

#### Шкала комплексної оцінки екобезпеки ТПС з ТРТ за $I_H$

$I_H$	0–10	11–20	21–31	32–43	44–55	56–66	67–77	78–89	90–100	>100
Балл	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Екос-ган	Сприя- тливий	Нор- маль- ний	Задові- льний	Напру- жений	Скла- дний	Незадо- вільний	Критич- ний	Пред- кризо- вий	Кри- зовий	Катаст- рофіч- ний

Для забезпечення експлуатаційної надійності та екологічної безпеки ТРТ, в умовах техногенного впливу, в роботі застосовано: удосконалення металургійних методів (ММ) — раціональний вибір трубної сталі за основним хімічним складом та неметалевими включеннями, з мінімізацією забруднення до-вкільля; технологічних методів (ТМ) — інноваційні технології зварювання, поверхневого зміцнення, та універсальний метод — розробка ефективних синергічних захисних композицій (СЗК) та модифікованих захисних покриттів (МЗП), на вторинній сировині, з утилізацією регіональних відходів (К – ЧП “ХВ” та ін.), а також обробку забрудненого ґрунту та стічних вод СЗК, з цеолі- том для зв’язування ВМ в нерухому форму, за рахунок фізико-хімічних мето- дів захисту (адсорбція, іонний обмін на цеоліті) та хімічних (металохелатуван- ня) [5, 16–23, 28].

Експериментальні дані (табл. 3, рис. 1–5) обробляли методами математи- чної статистики, з визначенням стандартної похибки  $S$ , яка становить при  $n = 6$ ,  $t = 2,75$  й довірчої імовірності  $0,95 : S = \pm 5...10\%$ . Визначали також коефіці- ент кореляції регресійним аналізом, за методом найменших квадратів. Малої- мовірні дані відкидали з врахуванням Q-критерію.

Таблиця 3

Уніфікована комплексна оцінка екостану ТПС з ТРТ, балл

Складові $I_H$	Без захисту	Із захистом (СЗК)	Комплексний захист (СЗК + ММ + ТМ)
1. $K_a$	6	2	1
2. $K_r$	8	4	2
3. $K_B$	8	4	3
4. $K_p$	6	3	2
5. $K_3$	7	3	2
6. $K_{KM}$	8	4	3
7. $K_{MЦВ}$	6	3	2
8. $K_{EMП}$	5	3	2
9. $K_V$	4	2	1
10. $K_{p3}$	5	3	1
$I_H$	63	31	19
Балл	6	3	2
Екостан	Незадовільний	Задовільний	Нормальний

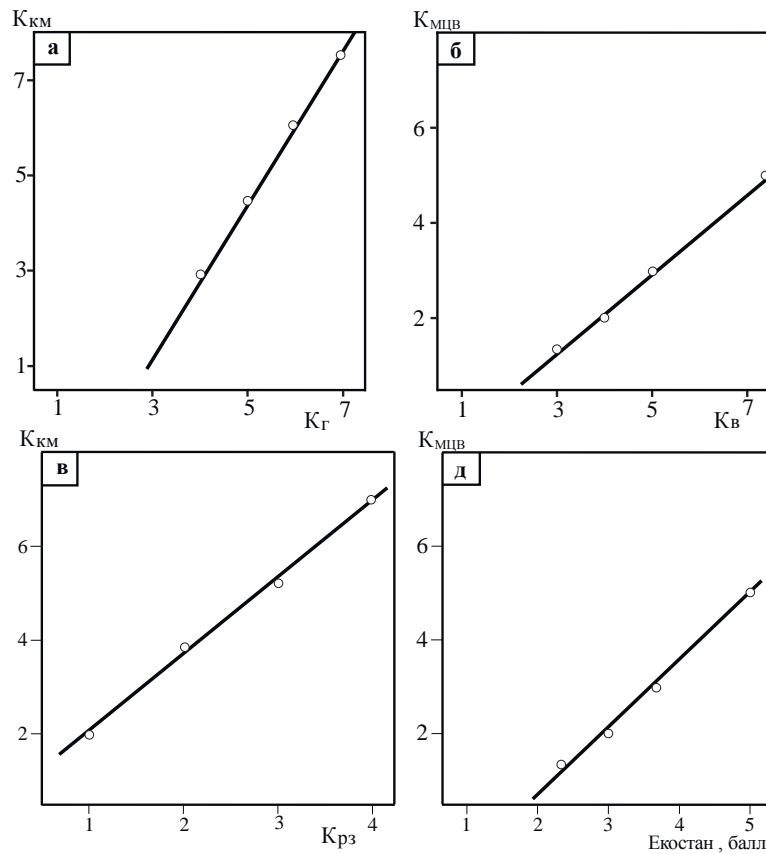


Рис. 1. Кореляційні залежності: а —  $K_{KM} = f(K_r)$ ; б —  $K_{MЦВ} = f(K_B)$ ; в —  $K_{KM} = f(K_{p3})$ ; д —  $K_{MЦВ} = f(K_{\text{екостан, балл}})$

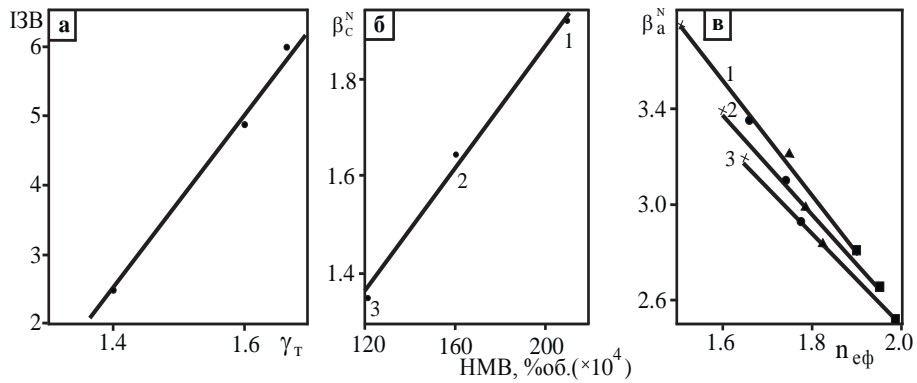


Рис. 2. Кореляційні залежності: а —  $\gamma_T=f(\text{IZB})$ ; б —  $\beta_C^N = f(\text{HMB, \%об.})$ , сталь високого відпуску: 1 — сталь 40X (ЕД), 2,3 — 10Г2ФР (2 — М, 3 — М+FeCe); в —  $\beta_a^N = f(n_{эф}, \text{HMB, IZB})$ , сталь 20ПЗ (× — С, • — О, ▲ — ПС, ■ — Н), 1 — НАСЕ, 2 — р. Білоус (IZB = 5,99), 3 — р. Десна (IZB = 2,5)

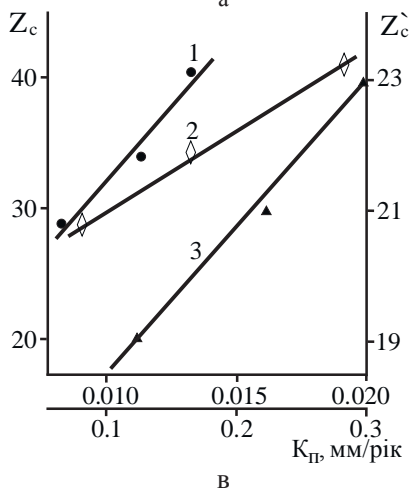
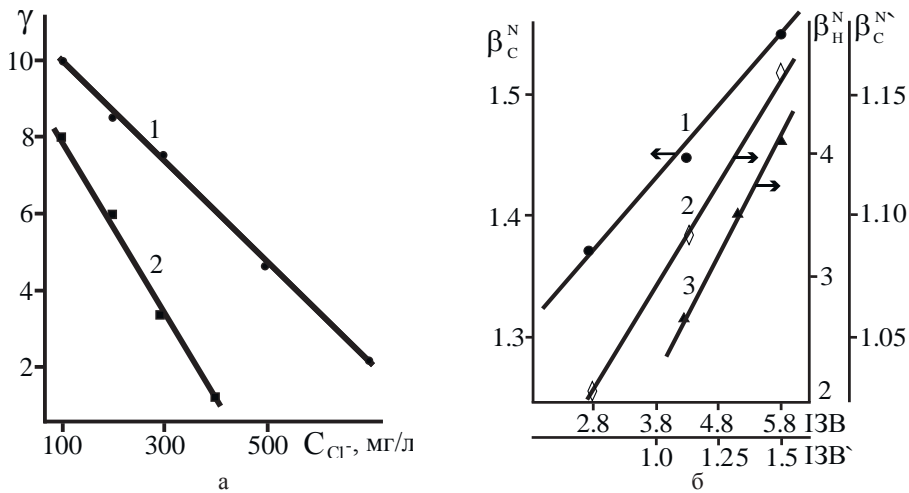


Рис. 3. Кореляційні залежності: а —  $\gamma = f(Z_c, C_{ст})$ , 1 —  $Z_c = 22$ ; 2 —  $Z_c = 78$ ; б —  $\beta_C^N$ ,  $\beta_H^N = f(\text{IZB})$ , 1 —  $\beta_C^N$ , 2 —  $\beta_H^N$ , 3 —  $\beta_C^N$ ; в —  $K_{п} = f(Z_c)$ , 1 — сталь 20, 2,3 — сталь 10кп, 3 — із захистом



II. Результати наукових досліджень

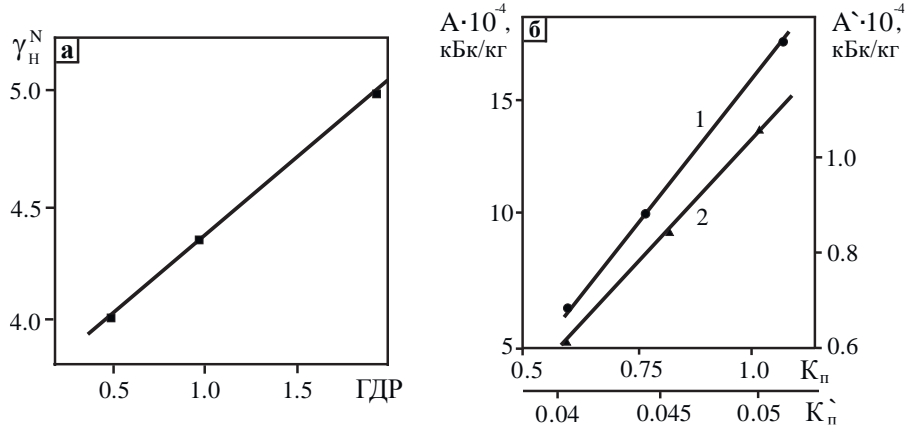


Рис. 4. Кореляційні залежності: а —  $\gamma_H^N = f(E, V/m)$ , за ГДР; б —  $K_{II} = f(A, \text{кБк/кг})$

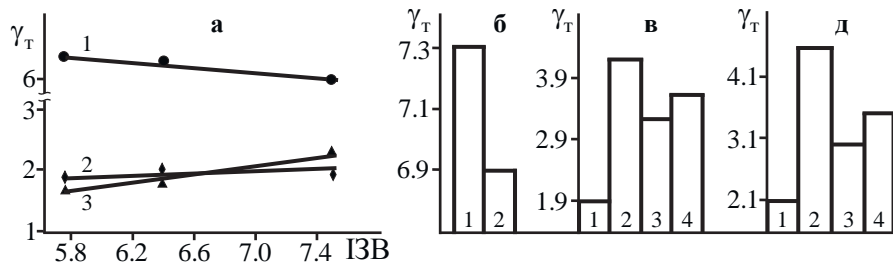


Рис. 5. Кореляційні залежності при поверхневому зміцненні: а —  $\gamma_T^C(1), \gamma_T^K(2), \gamma_T^a(3) = f(I3B) - \text{БШ, МО}$ ; б — ґрунт,  $Z_C = 61$ , за  $K_{II}$ : 1 — БШ (МО, 40Х), 2 — ВО (30ХГСНА); в — річкова вода (ІЗВ = 5,78): 1, 3 — за  $V_H$ , 2, 4 — за МЦВ (УХ), 1, 2 — сталь 20, 3, 4 — 12Х18Н10Т; д — стічна вода (ІЗВ = 7,51), 1-4 — так же, як і на “в”

З табл. 1–3, рис. 1–5 видно, що досліджений ґрунт (8 балл) характеризується як небезпечний [35], III категорії ( $Z_C = 66$ ), поверхневі води (р. Білоус) – брудні, V клас небезпеки [36, 37], ІЗВ = 5,99 (8 балл). Це значне інгредієнтне забруднення разом з енергетичним забрудненням (напруженим за  $K_{EMП} - 5$  балл ( $H = 6,5 \text{ А/м}$ ), помірно-допустимим за  $K_V$  (4 балл,  $L_V = 120 \text{ дБ}$ ) та помірним за РЗ (4 балл,  $1,1/0,16 \text{ Ки/км}^2$ , за Cs-137, Sr-90) обумовлюють суттєві втрати трубної сталі 20 – 5 група тривкості (мало тривкі) – 8 балл [38], високий ризик ( $5 \cdot 10^{-3}$ ) захворювань населення (7 балл) та техногенних аварій ( $K_{МЦВ} = 6$ , напружений стан),  $\beta_H^N = 3,9$ . Сумарний показник екологічної небезпеки  $I_H = 63$  (балл 6), що вказує на незадовільний екостан ТПС з ТРТ і потребує захисту від ТЗ. Використання СЗК на вторинній сировині, з утилізацією регіональних відходів [16–27] знижує екобезпеку ТЗ в 1,6–3 рази (за балльною оцінкою) табл. 3: забруднення повітря стає допустимим (2 балл), ґрунт – помірно-допустимим (II категорія небезпеки за  $Z_C = 18$ ), 4 балл. Вода з V класу якості (брудна) стає II класу (4 балл) – чиста (ІЗВ = 0,93). Акумуляція ТЗ в рослинах – допустимою (3 балл),  $K_{ac}$  знижується з 3,3 до 1,4, ризик щодо здоров'я населення зменшується до малого (балл 2), з  $5 \cdot 10^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{-5}$ ; енергетичне забруднення знижується: за ЕМП до помірно-допустимого (3 балл,  $5,1 \text{ А/м}$ ) з напру-

женого (5 балл, 6,5 А/м), за вібрацією – з 4 баллу (120 дБ) до 2 баллу (допустимого рівня,  $L_v = 94$  дБ), за РЗ з 5 баллу (1,1 Ку/км<sup>2</sup> за Cs-137 і 0,16 Ку/км<sup>2</sup> за Sr-90) до 3 баллу (низький рівень) – 0,22/0,06 Ку/км<sup>2</sup>. В результаті значно знижуються втрати металу (сталь 20 стає тривкою, балл 4), ризик техногенних аварій за витривалістю трубопровідного транспорту (він стає помірно-допустимим, балл 3,  $\beta_N^N = 1,6$ ). Сумарний показник безпеки  $I_H$  знижується в 2 рази. Екостан характеризується як задовільний (балл 3).

Комплексний захист (СЗК + ММ + ТМ) знижує:  $K_a$  – в 6 раз (з 6 до 1 баллу – до допустимого рівня),  $K_\Gamma$  – в 4 рази (з 8 до 2 баллів – допустимого рівня,  $Z_c$  зменшується з 66 до 11),  $K_B$  – в 2,7 рази (з 8 до 3 баллу – допустиме ТЗ, ІЗВ знижується з 5,99 до 0,31 – в 19,3 рази),  $K_P$  – в 3 рази (з 6 балу до 2,  $K_{ac}$  – в 2,8 раз, з 3,3 до 1,2, допустимого рівня),  $K_{EMH}$  – в 2,5 рази (з 5 до 2 балів, в 1,4 рази за напруженістю магнітного поля, Н, А/м);  $K_v$  – в 4 рази (з 4 бала до 1, в 1,5 рази за  $L_v$ , дБ);  $K_{P3}$  – в 5 раз (з 5 балів до 1, в 10 раз – по РЗ Cs-37, Sr-90, відповідно з 1,1 до 0,11, з 0,16 до 0,016 Ку/км<sup>2</sup>). Сумарний показник безпеки знижується в 3,3 рази – з 63 до 19 (в 3 рази – за балльною оцінкою). В результаті тривкість конструкційних матеріалів зростає в 2,7 рази за балльною оцінкою з 8 балів до 3, і більш ніж на 2 десяткові порядки за  $K_\Pi$ , мм/рік, з 5 групи тривкості (малотривкі) сталь стає 2 групи тривкості – дуже тривка. Ризик техногенних аварій за малоцикловою витривалістю (за  $\beta_N^N$ ) знижується за балльною оцінкою в 3 рази (з 6 до 2 балів), за  $\beta_N^N$  – в 2,8 раз (з 3,9 до 1,4).

Спостерігаються такі кореляційні залежності (рис. 1–5):

$K_{KM} = f(K_\Gamma, K_{P3})$	(8)	$K_{MЦВ} = f(K_B, \text{екос-тан, балл})$	(9)
$\gamma_T = f(IЗВ)$	(10)	$\beta_C^N = f(\text{НМВ, \%об.})$	(11)
$\beta_a^N = f(n_{\text{еф}}, \text{НМВ, ІЗВ})$	(12)	$\gamma = f(Z_c, C_{Cl^-})$	(13)
$\beta_a^N, \beta_C^N = f(IЗВ)$	(14)	$K_\Pi = f(Z_c)$	(15)
$\gamma_H^N = f(E)$	(16)	$K_\Pi = f(A)$	(17)
$\gamma_T^C, \gamma_T^K, \gamma_T^a = f(IЗВ) - \text{БШ}$	(18)	$\gamma_T = f(\text{ТМ}); \text{ТМ (БШ,ВО)}$	(19)
$V_{H^*N} = f(\text{ТМ}); \text{ТМ (УХ)}$	(20)		

Таким чином,  $K_{KM}$  корелює з  $K_\Gamma$ ,  $K_{P3}$  а  $K_{MЦВ}$  – з  $K_B$  та екостаном (балл), рис. 1. Запропоновані інноваційні технології захисту конструкційних матеріалів оцінювалися коефіцієнтами технологічної ефективності  $\gamma_T$ . Він при застосуванні ММ (рафінування сталі 10Г2ФР економічним металургійним методом – кінцевим розкисленням мартенівської сталі РЗМ (FeSe), за даними МЦВ, корелює із забрудненістю річкової води – ІЗВ (рис. 2, а), а  $\beta_C^N$  є функцією НМВ, % об. (рис. 2, б),  $\beta_a^N$ , при випробуваннях на малоциклову втому, при анодній поляризації, з визначенням негативного диференц-ефекту [40], коре-

## II. Результати наукових досліджень

лює з  $p_{\text{эф}}$ , НМВ, ІЗВ (рис. 2, в). Сумарний коефіцієнт гальмування корозії сталі в ґрунті  $\gamma$  корелює з  $Z_C$ ,  $C_{Cl^-}$  (рис. 3, а), а  $\beta_C^N$ ,  $\beta_H^N$  з ІЗВ (рис. 3, в),  $K_{\Pi}$  – з  $Z_C$  та типом сталі (рис. 3, в). Техногенний вплив енергетичного забруднення показано на рис. 4 ( $\gamma_H^N$  корелює з напруженістю електричної складової ЕМП –  $E$ , В/м) – рис. 4, а; втрати металу за  $K_{\Pi}$  (мм/рік) – з активністю  $A_{p3}$ , кБк/кг ( $Ku/km^2$ ) – рис. 4, б. Ефективність інноваційних технологій поверхневого зміцнення показана на рис. 5:  $\gamma_T^C$ ,  $\gamma_T^K$ ,  $\gamma_T^A$  – коефіцієнти технологічної ефективності захисту від корозії (с), катодної (к) та анодної (а) реакцій при обробці сталі 40Х на “білий шар” [25, 26] залежать від ІЗВ (рис. 5, а). На рис. 5, б показано залежність  $\gamma_T$  від типу обробки сталі (40Х, БШ та 30ХГСНА – віброобробка (ВО)) при визначенні тривкості металу  $K_{\Pi}$  (мм/рік), а на рис. 5, в, д –  $\gamma_T$ , при обробці сталі 20, 12Х18Н10Т ударною хвилюю (УХ) за результатами випробувань на МЦВ, наводнювання –  $V_H$ , в забрудненій річковій воді (ІЗВ = 5,78) та стічній воді (ІЗВ = 7,51). Оптиміальні синергічні добавки (СД) забезпечують  $\gamma_T = 29,6...71,9$ , в НСІ, рН0, на сталі 20, а СЗК на вторинній сировині – в річковій воді –  $\gamma_T = 21,7...45,5$ , в НСІ, рН0 –  $\gamma_T = 9,1...13,3$  (при випробуваннях на тривкість). Модифіковані захисні покриття (МЗП) на основі гліфталевих смол зберігають свої захисні властивості від корозії в НАСЕ, в електромагнітних полях ( $E = 10^3$  В/м) від  $Z = 99,3$  до  $Z = 99,7\%$  (в ЕП) та до  $Z = 95,1\%$  – в МП ( $H = 10$  А/м) – на зварних з’єднаннях сталі 16ГФР (за оптимальним режимом – АДЗ з об’ємним термозміцненням).  $\gamma_T$  МЗП на епоксидній смолі (ЕД-20), модифікованій КВС, з СЗК (з утилізацією відходів К, МП та ін.) в забрудненій річковій воді (ІЗВ = 3,9) складають 6,8 (ЕД-20), з КВС – 10, з КВС + СЗК – 23,3. Крім того, СЗК, МЗП мали не тільки превалюючі фізико-механічні та фізико-хімічні властивості, але й екологічні, в порівнянні з відомими захисними композиціями (це мало небезпечні матеріали, IV клас небезпечки, проти відомих – II клас – високо небезпечні та III клас – помірно небезпечні).

Універсальна захисна дія СЗК, на вторинній сировині, з утилізацією регіональних відходів, пов’язана з їх поліфункціональністю та багатокомпонентністю. Виробничі відходи містять активні протикорозійні угруповання, а добавки синергістів – полідентатних лігандів (похідні імідазолу, тіазолу), з декількома активними реакційними центрами, забезпечують в комплексі внутрішньомолекулярний та міжмолекулярний синергізм захисної дії. Це відбувається за рахунок утворення нерозчинних металохелатних комплексів з важкими металами, що переводить їх з рухомої форми в нерухому. В результаті знижується інгредієнтне техногенне забруднення небезпечними вільними катіонами ВМ та його негативна дія на конструкційні матеріали. Крім того, на поверхні конструкційних металів утворюються стійкі наномасштабні захисні плівки, що значно підвищують хімічний опір агресивним середовищам: зростають всі показники захисту трубної сталі ( $Z$ ,  $K$ ,  $K_H$ ,  $K_{кр}$ ). Таким чином, зменшуються основні складові інтегрального показника техногенної небезпечки  $I_H$ :  $K_{KM}$ ,  $K_{мцв}$  та ін., та забезпечується надійна експлуатація ТРТ та його екологічна безпека.

## Висновки

Встановлені чисельні кореляційні залежності між показниками тривкості, витривалості, експлуатаційної надійності конструкційних матеріалів трубопровідного транспорту (ТРТ) та техногенного інгредієнтного та енергетичного впливу, що разом складають інтегральний показник екологічної небезпеки  $I_H$ .

Запропонована уніфікована комплексна інтегральна 10-балльна оцінка техногенного впливу за сумарним показником екологічної небезпеки  $I_H$ , що включає десять складових.

Показано, що металургійними (ММ) та технологічними (ТМ) методами інноваційних технологій можна зменшити  $I_H$  в 2 рази (з використанням СЗК) та в 3 рази (з комплексним захистом – СЗК + ММ + ТМ) і таким чином вирішити екологічні проблеми ТРТ, пов’язані з інгредієнтним (особливо важкими металами) та енергетичним забрудненням природних та технологічних середовищ: тривкість конструкційних матеріалів значно підвищується (з 5 групи тривкості – мало тривкі, сталь стає 2 групи тривкості – дуже тривкі), ризик техногенних аварій на ТРТ за витривалістю при малоцикловому навантаженні зменшується в 3 рази.

*В работе рассмотрены экологические проблемы современного материаловедения, связанные с длительной (несколько десятилетий) работой конструкционных материалов в инженерных сооружениях, в частности, трубопроводном транспорте, в экстремальных условиях техногенного ингредиентного (особенно тяжелых металлов) и энергетического влияния (ЭМП, вибрация, радиация и др.), с тенденцией его усиления в ближайшей перспективе. Это обуславливает интенсификацию коррозионно-механического разрушения, техногенные аварии на наземном, подземном и подводном трубопроводном транспорте. Предложена унифицированная комплексная интегральная балльная оценка техногенного влияния по суммарному показателю экологической опасности –  $I_G$ , позволяющая своевременно предотвратить риск техногенных аварий, разрушения трубопроводного транспорта с применением технологических и металлургических методов и инновационных технологий.*

**Ключевые слова:** техногенное влияние, экологическая опасность, ингредиентное, энергетическое загрязнение, трубопроводный транспорт, инновационные технологии защиты конструкционных материалов.

*The ecological problems of modern sciences of materials which connected with long (some tens years) their work in engineer buildings, for example, pipeline transport, in the extreme conditions of the technogenous ingredient (especially heavy metals) and energetic influence (electromagnetic fields, vibration, radiation) with a tendency of intensification in the nearest perspective have been considered in this work. It is increased corrosion-mechanical fracture, technogenous accidents on the land, underground, underwater pipeline transport. It is offered the unificated complex integral estimate (in ball) of the technogenous influence, on the integrated coefficient of ecological danger –  $I_d$ . It is permitted in time to prevente risk of technogenous accidents, fracture of pipeline transport by using of technological and metallurgical methods and innovation technologies.*

**Keywords:** technogenous influence, ecological danger, ingredient, energetic contamination, pipeline transport, innovation technologies of construction materials protection.

## II. Результати наукових досліджень

1. *Пащенко Ю.* Розвиток, модернізація транспортної системи України / Ю. Пащенко, А. Давиденко // Економіка України. – 1998. – № 9. – С. 45–52.
2. *Мельник Л. Г.* Екологічна економіка. – Суми: Університет. книга, 2002. – 346 с.
3. *Рудько Г. І.* Екологічна безпека техноприродних геосистем / Г. І. Рудько, С. В. Гошовський. – К.: Нічлава, 2006. – 464 с.
4. *Старчак В. Г.* Влияние коррозионной ситуации на состояние экосистем // Ж. Монтажные и спецработы в строительстве. – 1992. – № 10. – С. 11–12.
5. *Старчак В. Г.* Екологічна безпека конструкційних матеріалів / В. Г. Старчак, О. І. Бондар. – К.: ДЕІ, 2008. – 40 с.
6. *Сучасне матеріалознавство XXI ст.* / відп. редактор акад. НАНУ І. К. Походня – К.: Наук. думка, 1998. – 658 с.
7. *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій* / під ред. акад. В. В. Панасюка – Львів: Каменяр, 1999. – Т. 1. – 352 с., Т. 2. – 346 с., Т. 3. – 286 с.
8. *Похмурський В. І.* Корозійно-механічне руйнування зварних конструкцій / В. І. Похмурський, Р. К. Мелехов, Г. М. Круцан та ін. – К.: Наук. думка, 1995. – 261 с.
9. *Сидоренко С. Н.* Коррозия металлов и вопросы экологической безопасности магистральных трубопроводов / С. Н. Сидоренко, Н. А. Черных. – М.: РУДН, 2002. – 83 с.
10. *Стеклов О. И.* Мониторинг и прогнозирование ресурса нефтегазовых сооружений в условиях их старения и коррозии // Тр. ГНЦ РФ НИФХИ им. Л. Я. Карпова, 1999. – Т. 2. – С. 204–205.
11. *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе.* НТЖ. – М.: ВНИИОЭНГ, 2000. – № 2, 3. – 33 с.
12. *Давыдова С. Л.* Тяжелые металлы как супертоксиканты XXI века / С. Л. Давыдова, В. И. Тагасов. – М.: РУДН, 2002. – 140 с.
13. *Охорона навколишнього природного середовища в Україні.* – Київ: Вид-во Раєвського. – Мінохорони НПС та ядерної безпеки України, 1997. – 95с.
14. *Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Чернігівській області за 2013 рік.* – Чернігів: Мінприроди України, ДУ ОНПС в Чернігівській обл., 2014. – 249 с.
15. *Добровольский В. В.* Миграционные формы и миграция масс тяжелых металлов в биосфере. – М.: Научный мир, 2006. – 280 с.
16. *Старчак В. Г.* Вплив екологічної ситуації на протикорозійний захист металоконструкцій / В. Г. Старчак, С. Д. Цибуля, Н. П. Буяльська та ін. // Фіз.-хім. механіка матер. – 2012. – Спецвип. № 9. – Т. 2. – С. 767–772.
17. *Цибуля С. Д.* Комплексне забезпечення екологічної безпеки трубопровідного транспорту // Там же. – С. 773–779.
18. *Старчак В. Г.* Наукові основи підвищення екологічної безпеки металоконструкцій у протикорозійному захисті / В. Г. Старчак, Н. П. Буяльська, С. Д. Цибуля // Фіз.-хім. механіка матер. – Спецвип. № 4. – 2004. – Т. 2. – С. 853–859.
19. *Старчак В. Г.* Екологічна безпека трубопровідного транспорту в умовах дії електромагнітних полів / В. Г. Старчак, С. Д. Цибуля, І. Д. Пушкарьова та ін. // Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського. – 2011. – Вип. 1 (66), Ч. 1 – С. 145–148.
20. *Старчак В. Г.* Противокоррозионная защита как эффективный фактор предотвращения экодеструктивного техногенного влияния на природную среду / В. Г. Старчак, С. Д. Цибуля // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2012. – № 6. – С. 35–39.
21. *Старчак В. Г.* Інгібуюча корозію композиція для хімічної очистки енергетичного обладнання / В. Г. Старчак, Н. П. Буяльська, С. Д. Цибуля та ін. – Патент України на винахід № 80288. 10.09.07 р. Бюл. № 14. – 7 с.

22. *Старчак В. Г.* Композиція для зменшення забруднення ґрунту важкими металами як небезпечними екологічно-корозійними агентами / В. Г. Старчак, С. Д. Цибуля, І. Д. Пушкарьова та ін. // Патент на корисну модель № 66437. 25.03.2011. – 8 с.
23. *Старчак В. Г.* Інтегральна оцінка в управлінні регіональною екологічною безпекою / В. Г. Старчак, С. Д. Цибуля, І. Д. Пушкарьова та ін. // Екологічна безпека. – Кременчук: КДУ, 2010, Вип. 2/(10). – С. 7–11.
24. *Старчак В. Г.* Комплексная система контроля и оценки эффективности защиты стали от коррозионно-механических разрушений в наводороживающих средах. – Чернигов: ВСНТО, 1983. – 69с.
25. *Бабей Ю. И.* Защита стали от коррозионно-механических разрушений / Ю. И. Бабей, Н. Г. Сопрунок. – К.: Техника, 1991. – 126 с.
26. *Старчак В. Г.* Повышение стойкости стали в электрохимических процессах: Автореф. дис... докт. техн. наук / 05.17.14, 05.17.03. – Киев: КПИ, 1989. – 37 с.
27. *Цибуля С. Д.* Розробка інгібіторів комплексної дії на вторинній сировині для захисту сталі від корозії та корозійно-механічного руйнування: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.14 /ФМІ НАНУ ім. Г. В. Карпенка. – Львів, 1999. – 19 с.
28. *Старчак В. Г.* Екологічна безпека техноприродних систем в умовах техногенного впливу важких металів / В. Г. Старчак, О. І. Бондар, І. Д. Пушкарьова та ін. // Фіз.-хім. механіка матер. – 2010. – Спецвип. № 8, Т. 2. – С. 815–821.
29. *Боков В. А.* Основы экологической безопасности / В. А. Боков, А. В. Луцки. – Симферополь: Сонат, 1998. – 224 с.
30. *ДСП-201-97.* Забруднення атмосферного повітря; ДСТУ ISO 14644-1:2004. Класифікація чистоти повітря.
31. *Экологическая экспертиза* / Под ред. В. М. Питулько. – М.: Асадема, 2005. – 480 с.
32. *Кораблѐва А. И.* Введение в экологическую экспертизу / А. И. Кораблѐва, Л. Г. Чесанов, Л. С. Савин. – Днепропетровск: Полиграфист, 2000. – 145 с.
33. *Рудько Г. І.* Конструктивна геоecологія: наукові основи та практичне втілення / Г. І. Рудько, О. М. Адаменко. – К.: Маклаут, 2008. – 320 с.
34. *Барановський В. А.* Екологічні проблеми атмосферного повітря. – К.: Центр екологічної освіти та інформації, 2000. – 115 с.
35. *ДСанПіН 2.2.7.029-99.* Охорона ґрунту; ISO 15799-2005.
36. *Хільчевський В. Х.* Водопостачання та водовідведення. Гідрологічні аспекти. – К.: КДУ, 1999. – 319 с.
37. *ДСанПіН 2.2.4.036-99.* Гігієнічні вимоги до якості води.
38. *ГОСТ 13819.* Десятибальна шкала корозійної тривкості металів.
39. *ДСП №173-1996.* ЕМП; ДСН 3.3.6.039-2001. Вібрація; НРБУ-97/Д-2000; ОСП РБУ №54, 2005. Радіаційна безпека.
40. *Старчак В. Г.* Небезпека впливу неметалевих включень на водневу деградацію сталі / В. Г. Старчак, С. О. Олексієнко, К. М. Іваненко, С. Д. Цибуля // Вісник Українського матеріалознавчого товариства, 2008. – № 1. – С. 122–141.