

УДК 620.194.22

Л. І. НИРКОВА

**АНАЛІЗ ВПЛИВУ КОМБІНАЦІЇ СТРЕС-КОРОЗІЙНИХ ЧИННИКІВ НА КОРОЗІЙНЕ РОЗТРИСКУВАННЯ ВІД НАПРУЖЕННЯ ТРУБНОЇ СТАЛІ ПРИ рН, БЛИЗЬКИХ ДО НЕЙТРАЛЬНИХ**

Досліджено корозійно-механічні властивості трубної сталі типу X70 в умовах комбінації чинників, за яких можливо корозійне розтріскування від напруження (КРН). Встановлено, що при потенціалі корозії, накопичених напруженнях у присутності локального осередку корозії (ЛОК) трубна сталь проявляє схильність до КРН за змінного змочування, яке не проявляється при повному зануренні. Змінне змочування за потенціалу -1,0 В в деякому ступені може прискорювати процес КРН. Схильність до КРН сталі з накопиченим рівнем напружень та ЛОК однакова як при повному, так і при змінному змочуванні, що вказує на превалюючий вплив на процес КРН катодного потенціалу та ЛОК порівняно із змінним змочуванням.

**Ключові слова:** корозійне розтріскування від напруження, трубна сталь, потенціал, стрес-корозійні чинники.

Исследованы коррозионно-механические свойства трубной стали типа X70 в условиях комбинации факторов, вызывающих коррозионное растрескивание под напряжением (КРН). Установлено, что при потенциале коррозии, при накопленном уровне напряжений в присутствии локального очага коррозии (ЛОК) трубная сталь проявляет склонность к КРН при переменном смачивании, что не проявляется при полном погружении. Переменное смачивание при потенциале -1,0 В в некоторой степени способствует ускорению процесса КРН. Склонность к КРН стали с накопленным уровнем напряжений и ЛОК одинакова как при полном, так и при переменном смачивании, что указывает на превалирующее влияние на процесс КРН катодного потенциала и ЛОК по сравнению с переменным смачиванием.

**Ключевые слова:** коррозионное растрескивание под напряжением, трубная сталь, потенциал, стресс-коррозионные факторы.

Corrosion-mechanical properties of pipe steel X70 in model soil electrolyte (MSE) under influence of different combination of factors were investigated. It was established that factors which led to stress-corrosion cracking (SCC), are corrosion environment, applied loads (stretching and cyclic) and cathodic potential. The presence of local corrosion defect (LCD) and variable moistening may promote in some extent SCC process. For example, under variable moistening by MSE at corrosion potential the pipe steel specimens with accumulated cyclic stress and LCD demonstrate the inclination to SCC, which don't occur at full immersion. At applied cathodic potential -1,0 V both at full immersion and at variable moistening pipe steel specimens in the initial state, with accumulated cycle stress without LCD and with accumulated cycle stress and LCD show the inclination to SCC. It should be noted that inclination to SCC of pipe steel with accumulated cyclic stress and in the presence of LCD is practically identical both at full immersion and at variable moistening, that indicate on prevail influence of cathode potential and LCD over variable moistening.

**Keywords:** stress-corrosion cracking, pipe steel, potential, stress-corrosion factors

**Вступ.** Аналізуючи досвід експлуатації магістральних газопроводів (МГ), можна виділити три найбільш значущі причини їх руйнування: корозійний знос, втома, корозійне розтріскування від напруження (КРН). Корозійне розтріскування від напруження розвивається із зовнішньої поверхні труби, що знаходиться в умовах катодного захисту, під покривом, що відшарувалося, у присутності ґрунтових електролітів, які містять карбонати і бікарбонати, зовнішніх і внутрішніх механічних напружень, що виникають при експлуатації газопроводів і виробництві труб [1].

Досвід експлуатації МГ показує, що КРН розвиваються навіть при належному функціонуванні системи катодного захисту як на прямошовних, так і на спіральшовних трубах з плівковою та гумовобітумною ізоляцією, в місцях її дефектів і відшарувань. Стосовно МГ термін КРН використовують для опису руйнувань металу труб, що відбуваються внаслідок повільного розвитку тріщин у процесі тривалої експлуатації.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Чинниками КРН, яким приділяють увагу сучасні вітчизняні та закордонні дослідники, є: рН середовища [2, 3], стан захисного покриву [4, 5], значення потенціалу катодного захисту [6, 7], особливості мікроструктури [8, 9], технологія виготовлення труби [10], нерівноважні термодинамічні процеси під дією терморушійних сил [11, 12] тощо.

В роботі [13] розглянуто чинники, присутність яких сприяє стрес-корозійному розтріскуванню МГ, яким присвоєно рекомендовані вагові коефіцієнти, наприклад: стан захисного покриву – 0,25; рівень ґрунтових вод – 0,20; змінне змочування поверхневими та внутрішньогрунтовими водами – 0,20; напружено-деформований стан МГ на ділянці – 0,15; тип ґрунту – 0,1; корозійна агресивність ґрунту – 0,05; магнітні

аномалії, виявлені з поверхні землі – 0,05. Сума вагових коефіцієнтів перерахованих чинників дорівнює 1.

Як видно з цих даних стану захисного покриву, змінному змочуванню та напружено-деформованому стану відповідають найбільші вагові коефіцієнти, і, імовірно ці чинники можна вважати найбільш вагомими. Але слід відмітити, що в переліку відсутній катодний потенціал, який, як показав досвід експлуатації МГ, може суттєво впливати на механізм КРН. Наприклад, для трубної сталі типу X70 за катодної поляризації при рН, близьких до нейтрального, існує критичний діапазон потенціалів (від -730 мВ до -920 мВ (відносно стандартного каломельного електроду), в якому реакція анодного розчинення може перебігати за катодної поляризації: якщо поляризаційний потенціал знаходиться в цій області, КРН перебігає за сумісного впливу обох механізмів [14]. Звичайно процес КРН перебігає за сумісного впливу кількох чинників одночасно, тому робота, в якій досліджено різні комбінації стрес-корозійних чинників є актуальною

**Ціль та задачі дослідження.** Мета роботи полягала в дослідженні впливу комплексу стрес-корозійних чинників у різній їх комбінації на схильність трубної сталі до КРН та визначенні такої, при якій схильність найвища. Задача досліджень містилася в обґрунтуванні вибору стрес-корозійних чинників та аналізі їх впливу на КРН. Для досягнення сформульованої мети поставлено та виконано такі завдання:

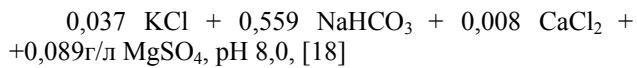
– проаналізовано зовнішні та внутрішні чинники КРН;

– досліджено та оцінено схильність трубної сталі до КРН при різній комбінації цих чинників в лабораторних умовах в розчинах з рН, близькими до нейтральних.

© Л. І. Ниркова. 2017

**Матеріали та методи досліджень схильності трубної сталі до КРН в лабораторних умовах.** Дослідження проводили на зразках трубної сталі типу Х70, виготовлених з труби діаметром 1420 мм з товщиною стінки 15,7 мм такого хімічного складу (у ваг. %): 0,095 С, 1,39 Мн, 0,255 Si, 0,005 S, 0,017 Р, 0,032 Al, 0,04 Ni, 0,03 Мо, 0,004 Ti, 0,05 V, 0,027 Nb, 0,04 Cr. Механічні характеристики сталі: тимчасовий опір розриву  $\sigma_b = 588$  МПа, границя текучості  $\sigma_T = 441$  МПа.

Робочим розчином слугував модельний ґрунтовий електроліт (МГЕ) складу, г/л:



з додаванням буферного розчину у співвідношенні 9:1, рН 8,2. Буферний розчин готували на дистильованій воді згідно з [15] змішуванням в потрібному співвідношенні гідрофосфатів натрію і калію –  $1/15 \text{ M Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  та  $1/15 \text{ M KH}_2\text{PO}_4$ .

Потенціал вимірювали відносно хлорсрібного електроду порівняння на потенціостаті ПИ-50. Порівняльні дослідження схильності до КРН проводили методом деформації з повільною швидкістю  $10^{-6}$  м/с плоских зразків на розривній машині АИМА-5-1. Під час корозійно-механічних випробувань контролювали такі показники: подовження зразка  $\Delta L$ , час до руйнування  $\tau$ , площа перерізу зразка в місті руйнування

$S$ , відносне звужування  $\Psi$  ( $\Psi = \frac{S_0 - S}{S_0}$ , де  $S_0$  і  $S$  –

площа поперечного перерізу зразка до та після випробувань, відповідно). Схильність сталі до КРН оцінювали за коефіцієнтом  $K$  (безрозмірна величина), яку обчислювали, як відношення відносного звужування зразка під час випробувань у повітрі до відносного

звужування у розчині –  $K = \frac{\Psi_n}{\Psi_p}$ . Вважали, якщо при

будь-якій комбінації чинників обчислене значення коефіцієнту  $K \geq 1,6$  і в руйнуванні присутня крихка складова, сталь є схильною до КРН; якщо  $K < 1,6$  і злам в'язкий – не схильна.

**Результати аналізу стрес-корозійних чинників та лабораторних досліджень схильності трубної сталі типу Х70 до КРН при їх різній комбінації.** Як було зазначено вище, КРН розвивається в умовах сумісної дії корозійно-активного середовища, активного

та пасивного захисту та напружень, що розтягують. Чинники, які залежать від марки трубної сталі, технології виробництва труби, рівня навантажень є внутрішніми; від умов пролягання МГ, агресивності ґрунтових вод, рівня потенціалу катодного захисту – зовнішніми.

Для газопроводів України характерним є КРН при рН, близьких до нейтральних. Найбільша кількість стрес-корозійних дефектів, як відомо з досвіду експлуатації МГ, утворюється при переходах через річки, в ярах, заболоченій місцевості та на ділянках зі змінним змочуванням. Для відтворення таких умов дослідження проводили при змінному змочуванні зразків розчином за схемою 10 хв у повітрі, 50 хв у розчині.

Вплив напружень на МГ під час експлуатації моделювали попереднім циклюванням зразків в повітрі в діапазоні граничних напружень від  $0,4\sigma_T$  до  $0,8\sigma_T$  з частотою 10 Гц впродовж  $10^5$  циклів. З досвіду експлуатації МГ також відомо, що стрес-корозійна тріщина починається від локальних корозійних дефектів, тому для прискорення її ініціювання та відтворення механізму локального анодного розчинення в лабораторних умовах на зразку трубної сталі моделювали локальний осередок корозії (далі ЛОК) V-подібної форми глибиною від 0,25 мм до 0,3 мм, який наносили на одну з поверхонь зразка механічним способом. Робили припущення, що стан зразка з накопиченими напруженнями та змодельованим ЛОК можна порівнювати зі станом експлуатованого МГ.

Вплив електрохімічного захисту моделювали наведенням потенціалу катодного захисту, який знаходився в діапазоні захисних поляризаційних потенціалів згідно з ДСТУ 4219 від -0,85 В до -1,15 В (відносно мідно-сульфатного електроду порівняння, що відповідає діапазону потенціалів від -0,75 В до -1,05 В відносно хлорсрібного).

Дослідження проводили за таких умов. Комбінацію внутрішніх чинників (хімічний склад сталі та технологія виробництва труби, рівень накопичених циклічних напружень, наявність локального осередка корозії) обирали однаковою. Варіювали зовнішні чинники: тривалість контакту із середовищем (повне занурення або змінне змочування) і значення потенціалу. Досліджено чотири комбінації чинників, які описано в табл. 1. Там же наведено результати корозійно-механічних випробувань зразків трубної сталі типу Х70 у повітрі та у розчині при цих комбінаціях чинників, фото зламу зразків – на рис. 1.

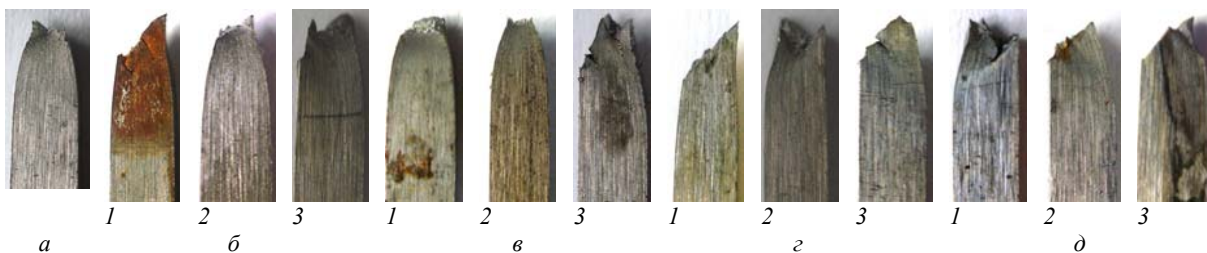
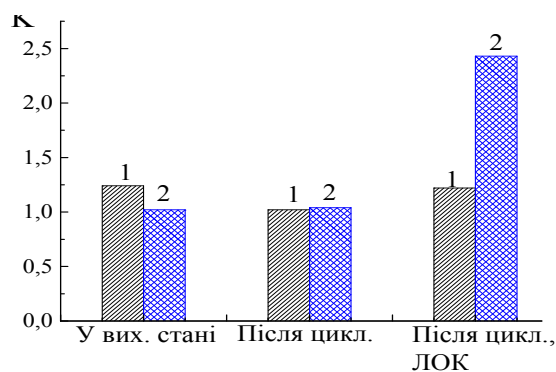


Рис. 1 – Фотографії зламу зразків трубної сталі типу Х70 у повітрі та у модельному ґрунтовому електроліті за різних потенціалів: а – у повітрі; б, в – при повному змочуванні розчином; в, д – при змінному змочуванні; б, в – за потенціалу корозії, в, д – за потенціалу -1,0 В; 1 – у вихідному стані; 2 – після циклювання, 3 – після циклювання з ЛОК

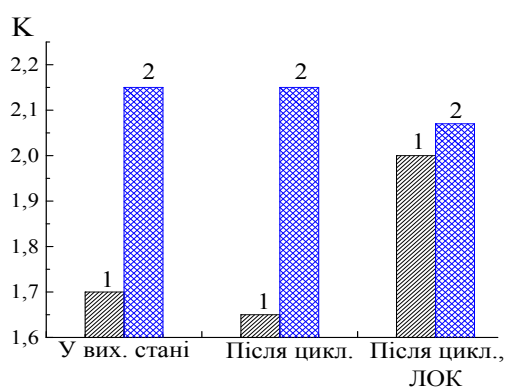
Таблиця 1 – Корозійно-механічні властивості зразків трубної сталі типу Х70 у повітрі та у розчині за різній комбінації стрес-корозійних чинників

Комплекс чинників	$\tau$ , год.	$\Delta L$ , м	$S$ , мм <sup>2</sup>	$\Psi$ %	$K$	Характер руйнування
Вихідний стан, повітря	19,5	0,00582	3,97	56	-	В'язкий
Вихідний стан, розчин, $E_k$	18,3	0,00497	4,97	45	1,24	В'язкий
Циклювання, розчин, $E_k$	17,0	0,00466	4,02	55	1,02	В'язкий
Циклювання, ЛОК, розчин, $E_k$	10	0,00292	4,69	46	1,22	В'язкий
Вихідний стан, змінне змочування, $E_k$	21	0,00592	4,05	55	1,02	В'язкий
Циклювання, змінне змочування, $E_k$	19	0,0061	4,14	54	1,04	В'язкий
Циклювання, ЛОК, змінне змочування, $E_k$	9	0,00204	6,97	23	2,43	Крихкий, в'язкий долом
Вихідний стан, розчин, -1,0 В	18,0	0,00505	6,07	33	1,7	Крихкий, в'язкий долом
Циклювання, розчин, -1,0 В	17,0	0,00507	5,94	34	1,65	Крихкий, в'язкий долом
Циклювання, ЛОК, розчин, -1,0 В	2,5	0,00051	6,5	28	2,00	Крихкий, в'язкий долом
Вихідний стан, змінне змочування, -1,0 В	14,5	0,00426	6,67	26	2,15	Крихкий, в'язкий долом
Циклювання, змінне змочування, -1,0 В	16	0,00468	6,62	26	2,15	Крихкий, в'язкий долом
Циклювання, ЛОК, розчин, змінне змочування, -1,0 В	7,5	0,00262	6,53	28	2,00	Крихкий, в'язкий долом

**Обговорення результатів досліджень схильності трубної сталі до КРН в умовах різної комбінації стрес-корозійних чинників.** З аналізу отриманих даних видно, що при повному зануренні в розчин та потенціалі корозії (у вихідному стані, після циклювання та після циклювання з ЛОК) руйнування – в'язке (рис. 1, б, фото 1-3), відносне звужування становило 45 %, 55 % та 46 %, відповідно, оцінена ступінь схильності до КРН – 1,24, 1,02 та 1,22 (табл. 1, рис. 2, а), тобто за такої комбінації чинників трубна сталь виявилася не схильною до КРН.



а



б

Рис. 2 – Ступінь схильності до КРН трубної сталі типу Х70 за різних потенціалів: а – за потенціалу корозії; б – та за потенціалу -1,0 В; 1 – при повному зануренні у розчин, 2 – при змінному змочуванні

Слід відмітити, що за цих умов ні циклювання, ні сумісний вплив циклювання та ЛОК не привели до зміни характеру руйнування.

Присутність змінного змочування не сприяло зміні характеру руйнування зразків у вихідному стані та після циклювання (рис. 1, в, фото 1 і 2), яке було в'язким. За цих умов відносне звужування за цих умов становило 55 % та 54 %, відповідно, коефіцієнт схильності до КРН становив 1,02 і 1,04, як видно з табл. 1, рис. 2, а. Тільки для зразків після циклювання з ЛОК відмічене суттєве підвищення схильності до КРН, оцінено коефіцієнтом 2,43, чому відповідало крихке руйнування з в'язким долом, рис. 1, в (фото 3). Виходячи з отриманих даних можна припустити, якщо тривало експлуатований МГ знаходиться в умовах змінного змочування і на його стінці наявні локальні корозійні дефекти висока імовірність зародження та розвитку стрес-корозійної тріщини.

За наведення катодного потенціалу -1,0 В при повному зануренні в розчин для всіх зразків (у вихідному стані, після циклювання та після циклювання з ЛОК), спостерігали зміну характеру руйнування, порівняно з руйнуванням за потенціалу корозії: воно стало крихким з в'язким доломом, рис. 1, г (фото 1-3), що корелювало зі зменшенням відносного звужування до 28-34 % (табл. 1) та вказувало на збільшення частки крихкої складової в зламі. Коефіцієнт схильності до КРН збільшився і для цих умов дорівнював 1,7, 1,65 і 2,0, відповідно.

При змінному змочуванні, як і при повному зануренні, для всіх зразків (у вихідному стані, після циклювання та після циклювання з ЛОК), за потенціалу катодного захисту -1,0 В руйнування мало крихкий характер з в'язким доломом, рис. 1, д (фото 1-3). Відносне звужування становило 26 %, 26 % і 28 %. Відмічене підвищення коефіцієнту схильності до КРН порівняно із повним зануренням близько на 20 % для зразків у вихідному стані та після циклювання, відповідно, рис. 2, б. Ступінь схильності до КРН для зразка після циклювання з ЛОК не змінилася, що імовірно обумовлено тим, що потенціал катодного захисту та ЛОК інтенсивніше впливають на цей процес, ніж змінне змочування.

### Висновки

1. Досліджено вплив різних комбінацій стрес-корозійних чинників на схильність трубної сталі типу Х70 до корозійного розтріскування від напруження. Встановлено, що при повному змочуванні за потенціалу корозії трубна сталь з накопиченим рівнем навантажень і локальним осередком корозії трубна не схильна до КРН. В умовах змінного змочування за таких самих умов трубна сталь проявляє схильність до КРН за змінного змочування, яке не проявляється при повному зануренні.

2. За наведеного потенціалу катодного захисту - 1,0 В, як при повному змочуванні, так і при змінному трубна сталь у вихідному стані, з накопиченим рівнем напружень без ЛОК і з накопиченим рівнем напружень та ЛОК схильна до КРН. Змінне змочування сприяє підвищенню схильності до КРН близько на 20 %. Ступінь схильності до КРН сталі з накопиченим рівнем напружень та ЛОК однакова як в умовах повного змочування, так і при змінному, що імовірно обумовлено тим, що потенціал катодного захисту та ЛОК інтенсивніше впливають на цей процес, ніж змінне змочування.

### Подяки

Автор висловлює подяку співробітникам відділу № 28 «Технологія зварювання труб» Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України пров. інж. Мельничуку С.Л., інж. П кат. Дарагановій Н. О., м.н.с. Осадчук С. О. за участь в проведенні досліджень та обробленні результатів, зав. відділом, к.т.н. Рибаківу А. О. – в обговоренні отриманих результатів.

### Список літератури:

1. Антонов, В. Г. Коррозионное растрескивание под напряжением труб магистральных газопроводов [Текст] / В. Г. Антонов, А. Г. Арабей, В. Н. Воронин, И. А. Долгов, М. М. Кантор, З. Кношински, Ю. П. Сурков. – М.: Наука, 2006. – 104 с.
2. Parkins, R. N. Transgranular stress corrosion cracking of high-pressure pipelines in contact with solutions of near neutral pH [Text] / R. N. Parkins, W. K. Blanchard, B. S. Delanty // Corrosion. – 1994. – Vol. 50, No. 5. – P. 394–408. doi: [10.5006/1.3294348](https://doi.org/10.5006/1.3294348)
3. Fu, A. Q. Characterization of corrosion of X70 pipeline steel in thin electrolyte layer under disbonded coating by scanning Kelvin probe [Text] / A. Q. Fu, X. Tang, Y. F. Cheng // Corrosion Science. – 2009. – Vol. 51, № 1. – P. 186–190. doi: [10.1016/j.corsci.2008.10.018](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.10.018)
4. Глазов, Н. П., Влияние состояния изоляции трубопроводов на скорость их коррозионного разрушения [Текст] / Н. П. Глазов, Н. Н. Глазов, М. А. Башаев // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2009. – № 1. – С. 47–49.
5. Хижняков, В. И. Предупреждение выделения водорода при выборе потенциала катодной защиты подземных стальных трубопроводов [Текст] / В. И. Хижняков // Коррозия: материалы, защита. – 2009. – № 9. – С. 7–10.
6. Мазель, А. Г. Водород – фактор коррозійного растрескивання трубопроводов [Текст] / Мазель А. Г. // Строительство трубопроводов. – 1992. – № 9. – С. 23–26.
7. Asahi, H. Role of Microstructures on Stress Corrosion Cracking of Pipeline Steels in Carbonate-Bicarbonate Solution [Text] / H. Asahi, T. Kushida, M. Kimura, H. Fukai, S. Okano // Corrosion. – 1999. – Vol. 55, № 7. – P. 644–652. doi: [10.5006/1.3284018](https://doi.org/10.5006/1.3284018)
8. Chu, R. Microstructure Dependence of Stress Corrosion Cracking Initiation in X-65 Pipeline Steel Exposed to a Near-Neutral pH Soil Environment [Text] / W. Chen, S.-H. Wang, F. King, T. R. Jack, R. R. Fessler // Corrosion. – 2004. – Vol. 60, № 3. – P. 275–283. doi: [10.5006/1.3287732](https://doi.org/10.5006/1.3287732)

9. Kentish, P. Stress corrosion cracking of gas pipelines – Effect of surface roughness, orientations and flattening [Text] / P. Kentish // Corrosion Science. – 2007. – Vol. 49, № 6. – P. 2521–2533. doi: [10.1016/j.corsci.2006.12.014](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.12.014)
10. Гаррис, Н. Активизация коррозионных процессов на магистральных газопроводах большого диаметра при импульсном изменении температуры [Электронный ресурс] / Н. Гаррис, Г. Аскаргов // Нефтегазовое дело. – 2006. – № 1. Режим доступа: [http://ogbus.ru/authors/Garris/Garris\\_5.pdf](http://ogbus.ru/authors/Garris/Garris_5.pdf)
11. Гаррис, Н. А. Изменение теплофизических характеристик грунта вокруг газопровода большого диаметра как причина активизации коррозионных процессов [Текст] / Н. А. Гаррис, И. Г. Исмагилов, А. Н. Бахтегареева // Нефтегазовое дело. – 2010. – № 1. – Режим доступа: [http://ogbus.ru/authors/Garris/Garris\\_6.pdf](http://ogbus.ru/authors/Garris/Garris_6.pdf)
12. СТО Газпром 2-2.3-173-2007 Инструкция по комплексному обследованию и диагностике магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://znaytovar.ru/gost/2/STO\\_Gazprom\\_2231732007\\_Instruk.html](https://znaytovar.ru/gost/2/STO_Gazprom_2231732007_Instruk.html)
13. Liu, Z. Y. Stress corrosion cracking behavior of X70 pipe steel in an acidic soil environment [Text] / Z. Y. Liu, X. G. Li, C. W. Du, G. L. Zhai Y. F. Cheng // Corrosion Science. – 2008. – Vol 50, № 8. – P. 2251–2257. doi: [10.1016/j.corsci.2008.05.011](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.05.011)
14. Лурье, Ю. Ю. Справочник по аналитической химии [Текст] / Ю. Ю. Лурье. – М.: Химия. – 1971. – 456 с.

### Bibliography (transliterated):

1. Antonov, V. G., Arabey, A. G., Voronin, V. N., Dolgov, I. A., Kantor, M. M., Knoshinski, Z., Surkov, Ju. P. (2006). Korrozionnoe rastreskivanie pod naprjazheniem trub magistral'nyh gazoprovodov. Moscow: Nauka, 104.
2. Parkins, R. N., Blanchard, W. K., Delanty, B. S. (1994). Transgranular stress corrosion cracking of high-pressure pipelines in contact with solutions of near neutral pH. Corrosion, 50 (5), 394–408. doi: [10.5006/1.3294348](https://doi.org/10.5006/1.3294348)
3. Fu, A. Q., Tang, X., Cheng, Y. F. (2009). Characterization of corrosion of X70 pipeline steel in thin electrolyte layer under disbonded coating by scanning Kelvin probe. Corrosion Science, 51 (1), 186–190. doi: [10.1016/j.corsci.2008.10.018](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.10.018)
4. Glazov, N. P., Glazov, N. N., Bashaev, M. A. (2009). Vlijanie sostojanija izoljacji truboprovodov na skorost' ih korrozionnogo razrushenija. Truboprovodnyj transport: teorija i praktika, 1, 47–49.
5. Khyzhniakov, V. Y. (2009). Preduprezhdenye vydelenija vodoroda pry vybore potentsyala katodnoi zashchyty podzemnykh stalnykh truboprovodov. Korrozija: materijaly, zashchita, 9, 7–10.
6. Mazel', A. Gh. (1992). Vodorod – faktor korrozionnogo rastreskivanyja truboprovodov. Stroitel'stvo truboprovodov, 9, 23–26.
7. Asahi, H., Kushida, T., Kimura, M., Fukai, H., Okano, S. (1999). Role of Microstructures on Stress Corrosion Cracking of Pipeline Steels in Carbonate-Bicarbonate Solution. Corrosion, 55 (7), 644–652. doi: [10.5006/1.3284018](https://doi.org/10.5006/1.3284018)
8. Chu, R., Chen, W., Wang, S.-H., King, F., Jack, T. R., Fessler, R. R. (2004). Microstructure Dependence of Stress Corrosion Cracking Initiation in X-65 Pipeline Steel Exposed to a Near-Neutral pH Soil Environment. Corrosion, 60 (3), 275–283. doi: [10.5006/1.3287732](https://doi.org/10.5006/1.3287732)
9. Kentish, P. (2007). Stress corrosion cracking of gas pipelines – Effect of surface roughness, orientations and flattening. Corrosion Science, 49 (6), 2521–2533. doi: [10.1016/j.corsci.2006.12.014](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.12.014)
10. Gharrys, N., Askarov, Gh. (2006). Aktyvyzacyja korrozionnykh processov na maghystal'nykh ghazoprovodakh bol'shogo diametra pry ympul'snom yzmenenyy temperatury Neftegazovoe delo, 1. Available at: [http://ogbus.ru/authors/Garris/Garris\\_5.pdf](http://ogbus.ru/authors/Garris/Garris_5.pdf)
11. Gharrys, N. A., Ysmaghylov, Y. Gh., Bakhteghareeva, A. N. (2010). Yzmenenye teplofyzycheskykh kharakterystyk ghrunta vokrug ghazoprovoda bol'shogo diametra kak prychyna aktyvyzacyi korrozionnykh processov. Neftegazovoe delo, 1. Available at: [http://ogbus.ru/authors/Garris/Garris\\_6.pdf](http://ogbus.ru/authors/Garris/Garris_6.pdf)
12. STO Ghazprom 2-2.3-173-2007. Ynstrukcyja po kompleksnomu obsledovaniju y dyagnostyke maghystal'nykh ghazoprovodov, podverzhennykh korrozionnomu rastreskivanyju pod naprjazheniem. Available at:



[https://znaytovar.ru/gost/2/STO\\_Gazprom\\_2231732007\\_Instruk.html](https://znaytovar.ru/gost/2/STO_Gazprom_2231732007_Instruk.html)

13. Liu, Z. Y., Li, X. G., Du, C. W., Zhai, G. L., Cheng, Y. F. (2008). Stress corrosion cracking behavior of X70 pipe steel in an acidic

soil environment. Corrosion Science, 50 (8), 2251–2257. doi: [10.1016/j.corsci.2008.05.011](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.05.011)

14. Lur'e, Ju. Ju. (1971). Spravochnik po analiticheskoj himii. Moscow: Himija. 456.

Надійшла (received) 19.04.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Аналіз впливу комбінації стрес-корозійних чинників на корозійне розтріскування від напруження трубної сталі при рН, близьких до нейтральних/ Л. І. Ниркова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С.12–16. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Анализ влияния комбинации стресс-коррозионных факторов на коррозионное растрескивание под напряжения трубой стали при рН, близких к нейтральным/ Л. И. Ныркова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С. 12–16.– Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Analysis of influence of stress-corrosion factors combination on stress-corrosion cracking of pipe steel at near neutral pH / L. Nyrkova // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 12–16.– Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-5459**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Ниркова Людмила Іванівна** – кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник відділу № 28 «Технологія зварювання труб» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України; вул. Казимира Малевича, 11, м. Київ-150, Україна, 03150, e-mail: [lnyrkova@gmail.com](mailto:lnyrkova@gmail.com)

**Ныркова Людмила Ивановна** – кандидат химических наук, старший научный сотрудник отдела № 28 «Технология сварки труб» Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины; ул. Казимира Малевича, 11, г. Киев, Украина, 03150, тел.: (044) 205-25-81, e-mail: [lnyrkova@gmail.com](mailto:lnyrkova@gmail.com)

**Lyudmila Nyrkova** – PhD, senior staff scientist of Department No 28 «Technology of pipes welding» Electric Welding Institute named by E. O Paton NAS of Ukraine; Kazimir Malevich str., 11, Kyiv, Ukraine, 03150 Tel.: (044) 205-25-81, e-mail: [lnyrkova@gmail.com](mailto:lnyrkova@gmail.com)

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА КОМПЛЕКСАМИ

УДК.514.18

Є. О. АДОНЬЄВ, В. М. ВЕРЕЩАГА, К. Ю. ЛИСЕНКО

### РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ ТЕХНІКИ АЛГЕБРАЇЧНОГО ФОРМУВАННЯ Б-ФУНКЦІЙ ДЛЯ ЧОТИРЬОХ ТОЧОК

Розроблено алгебраїчну техніку формування Б-функцій  $P_i$  для чотирьох точок, у загальному вигляді, тобто для усіх можливих варіантів значень параметрів від 0 до 1 для двох точок  $B$  і  $C$ , що знаходяться всередині відрізка  $AD$ . Запропоновано техніку знаходження кореляційних коефіцієнтів Б-функцій  $P_i$ . Наведено приклад застосування узагальненої техніки формування Б-функцій  $P_i$ .

**Ключові слова:** Б-функції, Б-криві, техніка формування, кореляційний коефіцієнт.

Разработана алгебраическая техника формирования Б-функций  $P_i$  для четырех точек, в общем виде, то есть для всех возможных вариантов значений параметров от 0 до 1 для двух точек  $B$  и  $C$ , которые находятся внутри отрезка  $AD$ . Предложено технику нахождения корреляционных коэффициентов Б-функций  $P_i$ . Приведен пример применения обобщенной техники формирования Б-функций  $P_i$ .

**Ключевые слова:** Б-функции, Б-кривые, техника формирования, корреляционный коэффициент.

The article proposed algebraic technique of forming B-functions (Balyuba functions)  $P_i$  to four points, in general, ie for all possible parameter values from 0 to 1 for the two points B and C, which are within the segment  $AD$ . A technique of finding of correlation coefficients B-functions  $P_i$  is proposed. An example of using generalized forming technique of B-functions  $P_i$  was shown. The application of the mathematical apparatus of the Balyuba-Naidysh point calculus for the modeling of multifactor processes is considered. In particular, we consider a method for constructing parabolic response surfaces on the basis of B-functions in point calculus. The authors take as a basis the scheme for constructing a second-order parabola in the point calculus. Researches of the properties of the function-parameters on the examples of constructing the curve from four points showed that the B-functions can also be obtained algebraically for the purpose of constructing models of multifactorial processes.

**Keywords:** four points, B-functions, B-curves, functional correlation coefficient, generalized forming technique, point calculation.

**Вступ.** У рамках точкового БН-числення [1] досить часто застосовують функції-параметри, які названі авторами Б-функції, що, при визначенні наперед значеннях параметрів, дорівнюють одиниці або нулю Б-функції, що позначаються  $P_i$ , є параметрами Б-кривих, які подані у точковій формі, і використовуються у створенні моделей процесів або ситуацій. Наразі існує проблема подальшого розвитку теорії Б-функцій, якій і присвячено дослідження цієї статті.

**Аналіз останніх досліджень.** У попередніх наших дослідженнях, що знаходяться у публікаціях, було розроблено техніку частинну для шістьох точок, узагальнену для трьох точок. З метою створення теорії Б-функцій, вважаємо за необхідне розробляти техніку формування Б-функцій для кривих, що проходять через більшу кількість, наперед заданих, точок.

**Формування мети дослідження.** Розробити техніку алгебраїчного формування Б-функцій, в узагальненій формі, для Б-кривих, які проходять через чотири, наперед визначених, точки.

**Основна частина.** Розглянемо випадок створення Б-функцій для Б-кривої, що повинна пройти через чотири, наперед визначені, точки  $A, B, C, D$  (рис.1).

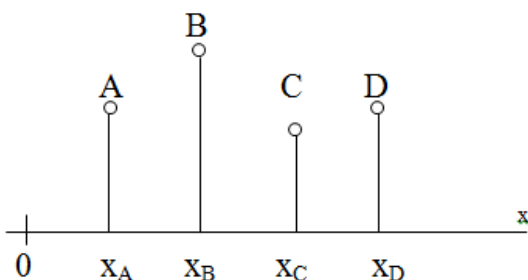


Рис. 1 – Схема щодо визначення параметру  $t_i$  ( $i = A, B, C, D$ ).

Нехай параметр  $t$ , що є аргументом для Б-функцій, визначається як відношення різниці координат  $x_i$ , для кожної з чотирьох точок

$$\begin{aligned} t_A &= \frac{x_A - x_A}{x_D - x_A} = 0; & t_B &= \frac{x_B - x_A}{x_D - x_A} = \frac{x_{BA}}{x_{DA}}; \\ t_C &= \frac{x_C - x_A}{x_D - x_A} = \frac{x_{CA}}{x_{DA}}; \\ t_D &= \frac{x_D - x_A}{x_D - x_A} = \frac{x_{DA}}{x_{DA}} = 1. \end{aligned} \quad (1)$$

Безумовно, для визначення аргументу  $t_i$ , можна обрати інші відношення, але у цій статті їх не будемо розглядати. Як бачимо з (1),  $0 \leq t \leq 1$ . Нехай Б-крива, що проходить через визначені точки  $A, B, C, D$ , задана точковим рівнянням:

$$M = AP_A + BP_B + CP_C + DP_D, \quad (2)$$

де  $P_A, P_B, P_C, P_D$  – Б-функції, які необхідно сформувати,

$$P_A + P_B + P_C + P_D = 1. \quad (3)$$

Розглянемо тепер окремо кожну з Б-функцій  $P_i$ , де  $i = A : B : C : D$ , для значень аргументу  $t_i$  з (1). Кожна з цих Б-функцій один раз має прийняти значення одиниці і три рази повинна дорівнювати нулю.

Наприклад,  $P_A$  у точці  $A$  дорівнює одиниці, а в точках  $B, C, D$   $P_A = 0$ . Виходячи з наявного досвіду формування Б-функцій, спочатку  $P_A$  будемо формувати у точках  $B, C, D$  і наостанок у точці  $A$ , у якій  $P_A = 1$ . Для формування  $P_i$  необхідно ввести аргумент  $\bar{t} = 1 - t$ , що доповнює  $t$  до одиниці.

1) Сформуємо  $P_A$  для точки  $B$ , у якій  $t_B = \frac{x_{BA}}{x_{DA}}$ ,

$\bar{t}_B = 1 - \frac{x_{BA}}{x_{DA}}$ ,  $P_A = 0$ . Найпростіший вигляд Б-функції буде наступним:

$$P_A = \alpha_{B1} t_B - \bar{t}_B, \text{ або } P_A = t_B - \alpha_{B2} \bar{t}_B. \quad (4)$$

Звідкіля

$$\alpha_{B1} = \frac{\bar{t}_B}{t_B}, \text{ або } \alpha_{B2} = \frac{t_B}{\bar{t}_B}, \text{ тобто } \alpha_{B2} = \frac{1}{\alpha_{B1}}. \quad (5)$$

Тут позначення  $\alpha$  обрано через те, формується Б-функція  $P_A$  для точки  $A$  у точці  $B$ , на що вказує індекс  $B$  1. Одиниця відповідає першому варіанту.

У подальшому будемо розглядати перший варіант із (4).

$$P_A = \alpha_{B1} t - \bar{t}. \quad (6)$$

Зауважимо, тут показано лише два варіанти для коефіцієнту  $\alpha$ , але їх можна утворити безліч.

2) Розглянемо техніку подальшого формування Б-функції  $P_A$  у точці  $C$ , аргументами у якій є  $t_C = \frac{x_{CA}}{x_{DA}}$  та  $\bar{t}_C = 1 - \frac{x_{CA}}{x_{DA}}$ ,  $P_A = 0$ , Б-функція у точці  $C$  повинна враховувати (5), тому у (6) підставимо аргументи для точки  $C$ , дістанемо:

$$P_A = \alpha_{B1} \frac{x_{CA}}{x_{DA}} - 1 + \frac{x_{CA}}{x_{DA}} = \frac{x_{CA}}{x_{DA}} (\alpha_{B1} + 1) - 1. \quad (7)$$

Зауважимо, що при будь-яких значеннях  $x_{CA}$ ,  $x_{DA}$ ,  $\alpha_{B1}$  рівняння (7) не буде дорівнювати нулю, а за умовою утворення Б-функцій  $P_A$  у точці  $C$  має дорівнювати нулю, тобто

$$P_A = b_1 (\alpha_{C1} t_C - \bar{t}_C), \text{ або } P_A = b_2 (t_C - \alpha_{C2} \bar{t}_C), \quad (8)$$

де

$$b_1 = \alpha_{B1} t - \bar{t}; b_2 = t - \alpha_{B2} \bar{t}.$$

У (7) розглянемо перший варіант, який має дорівнювати нулю, дістанемо:

$$b_1 (\alpha_{C1} t_C - \bar{t}_C) = 0, \text{ звідкіля } \alpha_{C1} = \frac{\bar{t}_C}{t_C}; \alpha_{C2} = \frac{1}{\alpha_{C1}}. \quad (9)$$

Якщо позначимо  $\alpha_{C1} t_C - \bar{t}_C = c_1$ , то Б-функція  $P_A$  у точці  $C$ , матиме вигляд:

$$P_A = b_1 c_1 = (\alpha_{B1} t - \bar{t}) (\alpha_{C1} t - \bar{t}). \quad (10)$$

3) Розглянемо техніку подальшого формування Б-функції  $P_A$  у точці  $D$ , аргументами у якій є  $t = 1; \bar{t} = 0$ ; Б-функція у точці  $D$  повинна враховувати (10) і дорівнювати 0, у такому разі  $P_A$  у точці  $D$  матиме вигляд

$$P_A = b_1 c_1 \bar{t}. \quad (11)$$

4) І насамкінець, сформуємо Б-функцію  $P_A$  у точці  $A$ , у якій аргументи  $t_A = 1; \bar{t}_A = 0; P_A = 1$ , тоді Б-функція  $P_A$  у точці  $A$  матиме вигляд:

$$P_A = |b_1 c_1 \bar{t}| = |\bar{t} (\alpha_{B1} t - \bar{t}) (\alpha_{C1} t - \bar{t})|. \quad (12)$$

$$t = 0; \bar{t} = 1; P_B = 0.$$

5) Розглянемо техніку формування Б-функції  $P_B$  у точці  $A$ , у якій аргумент  $C$

Враховуючи вихідні умови за аргументом, можемо записати, що у точці :

$$P_B = t. \quad (13)$$

6) Розглянемо подальше формування Б-функції  $P_B$  у точці  $C$ , аргументи у якій є  $t_C = \frac{x_{CA}}{x_{DA}}$  та

$\bar{t} = 1 - \frac{x_{CA}}{x_{DA}}$ ,  $P_B = 0$ , Б-функція у точці повинна враховувати (13), тому можемо записати:

$$P_B = t (\beta_{C1} t_C - \bar{t}_C). \quad (14)$$

Дорівняємо (14) нулю, отримаємо:

$$t_C (\beta_{C1} t_C - \bar{t}_C) = 0,$$

звідкіля

$$\beta_{C1} = \frac{\bar{t}_C}{t_C}; \beta_{C2} = \frac{1}{\beta_{C1}}. \quad (15)$$

Враховуючи (15), можемо записати Б-функцію з (14) у точці  $C$  наступним чином:

$$P_B = t (\beta_{C1} t - \bar{t}) = c_2. \quad (16)$$

7) Сформуємо Б-функцію  $P_B$  у точці  $D$ , аргументами у якій є  $t_D = 1; \bar{t}_D = 0; P_B = 0$ .

Б-функція  $P_B$  у точці  $D$  повинна враховувати (16), тоді маємо записати:

$$P_B = c_2 \bar{t}. \quad (17)$$

8) І насамкінець, сформуємо Б-функцію  $P_B$  у точці  $B$ , у якій аргументи  $t_B = \frac{x_{BA}}{x_{DA}}$  та  $\frac{x_{BA}}{x_{DA}}$ ,  $P_B = 1$ .

Скористаємося Б-функцією (16)

$$\beta \frac{x_{BA}}{x_{DA}} \left(1 - \frac{x_{BA}}{x_{DA}}\right) \left(\beta_{C1} \frac{x_{BA}}{x_{DA}} - \left(1 - \frac{x_{BA}}{x_{DA}}\right)\right) = 1, \bar{t}_B = 1 -$$

звідкіля дістанемо

$$\beta = \frac{1}{\frac{x_{BA}}{x_{DA}} \left(1 - \frac{x_{BA}}{x_{DA}}\right) \left(\beta_{C1} \frac{x_{BA}}{x_{DA}} - \left(1 - \frac{x_{BA}}{x_{DA}}\right)\right)}. \quad (18)$$

Тоді, враховуючи (18) та (17), Б-функція  $P_B$  у точці  $B$  матиме вигляд:

$$P_B = |\beta \bar{t}_C| = |\beta t \bar{t} (\beta_{C1} t - \bar{t})|. \quad (19)$$

9) Розглянемо техніку формування Б-функції  $P_C$  у точці  $A$ , у якій аргумент  $t = 0; \bar{t} = 1$ , а сама  $P_C = 0$ . Тоді:

$$P_C = t. \quad \text{т} \quad (20)$$

10) Сформуємо Б-функцію  $P_C$  у точці  $B$ , у якій  $t_B = \frac{x_{BA}}{x_{DA}}$ ;  $\bar{t}_B = 1 - \frac{x_{BA}}{x_{DA}}$ , а функція  $P_C$  має дорівнювати нулю  $P_C = 0$ . Враховуючи (20), маємо записати:

$$P_C = t(\gamma_{B1} t_B - \bar{t}_B),$$

тоді

$$\gamma_{B1} t_B - \bar{t}_B = 0 \rightarrow \gamma_{B1} = \frac{\bar{t}_B}{t_B}$$

$$t_B - \gamma_{B2} \bar{t}_B = 0 \rightarrow \gamma_{B2} = \frac{t_B}{\bar{t}_B}, \quad (21)$$

звідкіля

$$\gamma_{B2} = \frac{1}{\gamma_{B1}}.$$

Тоді кінцевий вираз Б-функції  $P_C$  у точці  $B$  матиме вигляд:

$$P_C = t(\gamma_{B1} t - \bar{t}) = c_3. \quad (22)$$

11) Сформуємо Б-функцію  $P_C$  у точці  $D$ , у якій аргументи дорівнюють  $t = 1; \bar{t} = 0$ , а Б-функція  $P_C = 0$ .

$$P_C = c_3 \bar{t} = t \bar{t} (\gamma_{B1} t - \bar{t}). \quad (23)$$

12) І насамкінець, сформуємо Б-функцію  $P_C$  у точці  $C$ , у якій аргументи дорівнюють  $t_C = \frac{x_{CA}}{x_{DA}}$  та

$\bar{t}_C = 1 - \frac{x_{CA}}{x_{DA}}$ , а сама Б-функція  $P_C = 1$ . Враховуючи

вихідні дані, маємо записати:

$$P_C = \gamma_{C1} t_C (1 - t_C) (\gamma_{B1} t_C - \bar{t}_C),$$

тоді

$$\gamma = \frac{1}{t_C (1 - t_C) (\gamma_{B1} t_C - \bar{t}_C)}. \quad (24)$$

Кінцевий вираз Б-функції  $P_C$  у точці  $C$  матиме вигляд:

$$P_C = |\gamma_{C1} t \bar{t} (\gamma_{B1} t - \bar{t})|. \quad (25)$$

13) Сформуємо Б-функцію  $P_D$  у точці  $A$ , у якій аргументами є  $t = 0; \bar{t} = 1$ , а сама Б-функція  $P_D = 0$ . Виходячи з вихідних даних

$$P_D = t. \quad (26)$$

14) Сформуємо Б-функцію  $P_D$  у точці  $B$ , у якій аргументами є  $t_B = \frac{x_{BA}}{x_{DA}}$ ;  $\bar{t}_B = 1 - \frac{x_{BA}}{x_{DA}}$ , а Б-функція  $P_D = 0$ . Визначимо коефіцієнти:

$$\delta_{B1} t_B - \bar{t}_B = 0 \rightarrow \delta_{B1} = \frac{\bar{t}_B}{t_B};$$

$$t_B - \delta_{B2} \bar{t}_B = 0 \rightarrow \delta_{B2} = \frac{t_B}{\bar{t}_B}; \rightarrow \delta_{B2} = \frac{1}{\delta_{B1}}. \quad (27)$$

Тоді кінцевий вираз Б-функції у точці  $B$  матиме вигляд:

$$P_D = t(\delta_{B1} t - \bar{t}) = d_1. \quad (28)$$

15) Сформуємо Б-функцію  $P_D$  у точці  $C$ , у якій аргументами є  $t_C = \frac{x_{CA}}{x_{DA}}$ ;  $\bar{t}_C = 1 - \frac{x_{CA}}{x_{DA}}$ , а Б-функція  $P_D = 0$ .

Визначимо коефіцієнти:

$$\delta_{C1} t_C - \bar{t}_C = 0 \rightarrow \delta_{C1} = \frac{\bar{t}_C}{t_C};$$

$$t_C - \delta_{C2} \bar{t}_C = 0 \rightarrow \delta_{C2} = \frac{t_C}{\bar{t}_C}; \rightarrow \delta_{C2} = \frac{1}{\delta_{C1}}. \quad (29)$$

Тоді кінцевий вираз Б-функції  $P_D$  у точці  $C$  матиме вигляд:

$$P_D = d_1 (\delta_{C1} t - \bar{t}). \quad (30)$$

16) Сформуємо Б-функцію  $P_D$  у точці  $D$ , аргументами у якій є  $t_D = 1; \bar{t}_D = 0; P_D = 1$ .



Враховуючи вихідні дані можемо записати:

$$\delta t(\delta_{B1}t - \bar{t})(\delta_{C1}t - \bar{t}) = 1,$$

звідкіля

$$\delta = \frac{1}{t(\delta_{B1}t - \bar{t})(\delta_{C1}t - \bar{t})}. \quad (31)$$

Тоді кінцевий вираз Б-функції  $P_D$  у точці  $D$  матиме вигляд:

$$P_D = |\delta t(\delta_{B1}t - \bar{t})(\delta_{C1}t - \bar{t})|. \quad (32)$$

Згуртуємо кінцеві вирази Б-функцій  $P_i$  у табл. 1.

Таблиця 1 – Узагальнені вирази Б-функцій  $P_i$

$P_i$	Узагальнений вираз	Номер за текстом
$P_A$	$ \bar{t}(\alpha_{B1}t - \bar{t})(\alpha_{C1}t - \bar{t}) $	(12)
$P_B$	$ \beta t \bar{t}(\beta_{C1}t - \bar{t}) $	(19)
$P_C$	$ \gamma_{C1} \bar{t}(\gamma_{B1}t - \bar{t}) $	(25)
$P_D$	$ \delta t(\delta_{B1}t - \bar{t})(\delta_{C1}t - \bar{t}) $	(32)

Якщо уважно придивитися, то можна побачити симетричність  $P_A$  і  $P_D$ ,  $P_B$  і  $P_C$ , тобто кінцевих Б-функцій  $P_A$  і  $P_D$  та Б-функцій, що знаходяться всередині  $P_B$  і  $P_C$ . Дійсно, симетричність, відповідних за місцем розташування, Б-функцій  $P_i$  є характерною особливістю.

**Приклад.** Нехай координати  $x$  вихідних точок дорівнюють  $x_A = 2; x_B = 5; x_C = 9; x_D = 11$ , тоді у відповідності до (1),  $t_A = 0; t_B = \frac{1}{3}; t_C = \frac{7}{9}; t_D = 1$ .

Розрахуємо за (12)  $P_A$  для усіх  $t_A, t_B, t_C, t_D$ .

Значення  $P_A$ :

– у точці  $A: t = 0; \bar{t} = 1$ ; тоді

$$P_A = |1(0-1)(0-1)| = 1;$$

– у точці  $B: t = \frac{1}{3}; \bar{t} = \frac{2}{3}$ ; тоді

$$P_A = \left| \frac{2}{3} \left( \frac{2}{3} - \frac{2}{3} \right) \left( \frac{2}{21} - \frac{2}{3} \right) \right| = 0;$$

– у точці  $C: t = \frac{7}{9}; \bar{t} = \frac{2}{9}$ ; тоді

$$P_A = \left| \frac{2}{9} \left( 2 \cdot \frac{7}{9} - \frac{2}{9} \right) \left( \frac{2}{9} - \frac{2}{9} \right) \right| = 0;$$

– у точці  $D: t = 1; \bar{t} = 0$ ; тоді

$$P_A = \left| 0(2-0) \left( \frac{2}{7} - 0 \right) \right| = 0;$$

Розрахуємо за (19)  $P_B$  для усіх  $t_A, t_B, t_C, t_D$ .

Значення  $P_B$ :

– у точці  $A: t = 0; \bar{t} = 1$ ; тоді

$$P_B = \left| 1 \cdot 0 \cdot 1 \left( \frac{2}{7} \cdot 0 - 1 \right) \right| = 0;$$

– у точці  $B: t = \frac{1}{3}; \bar{t} = \frac{2}{3}$ ; тоді

$$P_B = \left| -\frac{189}{24} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{2}{3} \left( \frac{4}{189} - \frac{4}{27} \right) \right| = 1;$$

– у точці  $C: t = \frac{7}{9}; \bar{t} = \frac{2}{9}$ ; тоді

$$P_B = \left| \beta \cdot \frac{7}{9} \cdot \frac{2}{9} \left( \frac{2}{9} \cdot \frac{7}{9} - \frac{2}{9} \right) \right| = 0;$$

– у точці  $D: t = 1; \bar{t} = 0$ ; тоді

$$P_B = \left| \beta \cdot 1 \cdot 0 \left( \frac{2}{7} \cdot 1 - 0 \right) \right| = 0;$$

Розрахуємо за (25)  $P_C$  для усіх  $t_A, t_B, t_C, t_D$ .

Значення  $P_C$ :

– у точці  $A: t = 0; \bar{t} = 1$ ; тоді

$$P_C = |1 \cdot 0 \cdot 1(2 \cdot 0 - 1)| = 0;$$

– у точці  $B: t = \frac{1}{3}; \bar{t} = \frac{2}{3}$ ; тоді

$$P_C = \left| \gamma \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{2}{3} \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3} - \frac{2}{3} \right) \right| = 0;$$

– у точці  $C: t = \frac{7}{9}; \bar{t} = \frac{2}{9}$ ; тоді

$$P_C = \left| \frac{243}{56} \cdot \frac{7}{9} \cdot \frac{2}{9} \left( 2 \cdot \frac{7}{9} - \frac{2}{9} \right) \right| = 1;$$

– у точці  $D: t = 1; \bar{t} = 0$ ; тоді

$$P_C = |\gamma \cdot 1 \cdot 0(2 \cdot 1 - 0)| = 0;$$

Розрахуємо за (32)  $P_D$  для усіх  $t_A, t_B, t_C, t_D$ .

Значення  $P_D$ :

– у точці  $A: t = 0; \bar{t} = 1$ ; тоді

$$P_D = \left| 0 \cdot \delta(2 \cdot 0 - 1) \left( \frac{2}{7} \cdot 0 - 1 \right) \right| = 0;$$

– у точці  $B: t = \frac{1}{3}; \bar{t} = \frac{2}{3}$ ; тоді

$$P_D = \left| \frac{1}{3} \cdot \delta \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3} - \frac{2}{3} \right) \left( \frac{2}{7} \cdot \frac{1}{3} - \frac{2}{3} \right) \right| = 0;$$

– у точці  $C: t = \frac{7}{9}; \bar{t} = \frac{2}{9}$ ; тоді

$$P_D = \left| \delta \cdot \frac{7}{9} \left( 2 \cdot \frac{7}{9} - \frac{2}{9} \right) \left( \frac{2}{7} \cdot \frac{7}{9} - \frac{2}{9} \right) \right| = 0;$$

– у точці  $D: t=1; \bar{t}=0$ ; тоді

$$P_D = \left| \frac{7}{4} \cdot 1(2 \cdot 1 - 0) \left( \frac{2}{7} \cdot 1 - 0 \right) \right| = 1.$$

Результати розрахунків за цим прикладом зведемо у табл. 2.

Таблиця 2 – Розрахунки за прикладом

	A	B	C	D
$P_A$	1	0	0	0
$P_B$	0	1	0	0
$P_C$	0	0	1	0
$P_D$	0	0	0	1
$\Sigma P_i$	1	1	1	1

Як бачимо у вихідних точках, у яких було сформовано Б-функції  $P_i$ , їхня сума  $\Sigma P_i = 1$ . Однак, у проміжку між ними не завжди буде зберігатися одиниця для суми  $P_i$ . Це відбувається через те, що значення  $P_i = 0$  не є зумовленим єдиною геометричною схемою і можуть належати до різних геометричних схем. Для усунення цієї не зумовленості треба для будь-яких значень параметрів  $t$  що не співпадають з параметрами точок, наприклад

$$\begin{aligned} t_{AB} &= \frac{t_A + t_B}{2}; t_{BC1} = \frac{t_B + t_C}{3}; \\ t_{BC2} &= \frac{2(t_B + t_C)}{3}; t_{CD} = \frac{t_C + t_D}{2}. \end{aligned} \quad (33)$$

У цьому прикладі на відріжку  $CB$  взято два параметри то, що у наведеному вище прикладі, відрізок  $CB$  є найбільшим, а для взаємно-однозначного розв'язання необхідно розглянути не менш чотирьох рівнянь.

$$\begin{aligned} &a \left| \bar{t}_{AB} (\alpha_{B1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) (\alpha_{C1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| + \\ &+ b \left| \beta t_{AB} \bar{t}_{AB} (\beta_{C1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| + \\ &+ c \left| \gamma t_{AB} \bar{t}_{AB} (\gamma_{B1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| + \\ &+ d \left| \delta t_{AB} (\delta_{B1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) (\delta_{C1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| = 1. \end{aligned} \quad (34)$$

Введемо позначення:

$$\begin{aligned} x_{11} &= \left| \bar{t}_{AB} (\alpha_{B1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) (\alpha_{C1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| \\ x_{11} &= \left| \bar{t}_{AB} (\alpha_{B1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) (\alpha_{C1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| \\ x_{11} &= \left| \bar{t}_{AB} (\alpha_{B1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) (\alpha_{C1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| \\ x_{14} &= \left| \delta t_{AB} (\delta_{B1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) (\delta_{C1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| \\ x_{14} &= \left| \delta t_{AB} (\delta_{B1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) (\delta_{C1} t_{AB} - \bar{t}_{AB}) \right| \\ x_{22} &= \left| \beta t_{BC1} \bar{t}_{BC1} (\beta_{C1} t_{BC1} - \bar{t}_{BC1}) \right| \\ x_{23} &= \left| \gamma t_{BC1} \bar{t}_{BC1} (\gamma_{B1} t_{BC1} - \bar{t}_{BC1}) \right| \\ x_{24} &= \left| \delta t_{BC1} (\delta_{B1} t_{BC1} - \bar{t}_{BC1}) (\delta_{C1} t_{BC1} - \bar{t}_{BC1}) \right| \\ x_{31} &= \left| \bar{t}_{BC2} (\alpha_{B1} t_{BC2} - \bar{t}_{BC2}) (\alpha_{C1} t_{BC2} - \bar{t}_{BC2}) \right| \\ x_{32} &= \left| \beta t_{BC2} \bar{t}_{BC2} (\beta_{C1} t_{BC2} - \bar{t}_{BC2}) \right| \\ x_{33} &= \left| \gamma t_{BC2} \bar{t}_{BC2} (\gamma_{B1} t_{BC2} - \bar{t}_{BC2}) \right| \\ x_{34} &= \left| \delta t_{BC2} (\delta_{B1} t_{BC2} - \bar{t}_{BC2}) (\delta_{C1} t_{BC2} - \bar{t}_{BC2}) \right| \\ x_{41} &= \left| \bar{t}_{CD} (\alpha_{B1} t_{CD} - \bar{t}_{CD}) (\alpha_{C1} t_{CD} - \bar{t}_{CD}) \right| \\ x_{42} &= \left| \beta t_{CD} \bar{t}_{CD} (\beta_{C1} t_{CD} - \bar{t}_{CD}) \right| \\ x_{43} &= \left| \gamma t_{CD} \bar{t}_{CD} (\gamma_{B1} t_{CD} - \bar{t}_{CD}) \right| \\ x_{44} &= \left| \delta t_{CD} (\delta_{B1} t_{CD} - \bar{t}_{CD}) (\delta_{C1} t_{CD} - \bar{t}_{CD}) \right| \end{aligned} \quad (35)$$

Тоді, враховуючи (35), аналогічно (34), складемо систему рівнянь, за допомогою якої буде здійснено кореляцію сформованих Б-функцій:

$$\left. \begin{aligned} ax_{11} + bx_{12} + cx_{13} + dx_{14} &= 1 \\ ax_{21} + bx_{22} + cx_{23} + dx_{24} &= 1 \\ ax_{31} + bx_{32} + cx_{33} + dx_{34} &= 1 \\ ax_{41} + bx_{42} + cx_{43} + dx_{44} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

Застосовуючи до (36) правило Крамера, отримаємо значення кореляційних коефіцієнтів:

$$a = \frac{D_a}{D}; b = \frac{D_b}{D}; c = \frac{D_c}{D}; d = \frac{D_d}{D}, \quad (37)$$

де

$$D = \begin{vmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{vmatrix}; D_a = \begin{vmatrix} 1 & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ 1 & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ 1 & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ 1 & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{vmatrix};$$

$$D_b = \begin{vmatrix} x_{11} & 1 & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & 1 & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & 1 & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & 1 & x_{43} & x_{44} \end{vmatrix}; D_c = \begin{vmatrix} x_{11} & x_{12} & 1 & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & 1 & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & 1 & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & 1 & x_{44} \end{vmatrix};$$

$$D_d = \begin{vmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & 1 \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & 1 \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & 1 \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & 1 \end{vmatrix}. \quad (38)$$

Треба зауважити, що за допомогою коефіцієнтів з (37) відбувається кореляція не тільки у точках з аргументами (33), а й неперервно по усій Б-кривій (2) в цілому:

$$aP_A + bP_B + cP_C + dP_D = 1. \quad (39)$$

З урахуванням (39), точкове рівняння Б-кривої (2) матиме вигляд:

$$M = AaP_A + BbP_B + CcP_C + DdP_D. \quad (40)$$

**Висновок.** Розроблено узагальнену техніку алгебраїчного формування Б-функцій  $P_i$  для Б-кривої, яка мусить пройти через чотири, наперед визначені, точки. При цьому, Б-функції  $P_i$  формуються на базі параметру  $t_i$ , який є відношенням різниці абсцис вихідних точок. Запропоновано техніку знаходження коефіцієнтів кореляції для Б-функцій  $P_i$  з метою об'єднання їх для подання Б-кривої у вигляді точкового рівняння.

Застосування запропонованої техніки алгебраїчного формування Б-функцій  $P_i$  дозволить створити клас Б-кривих, на основі яких буде виконуватися моделювання багатофакторних процесів.

#### Список літератури:

1. Адоньєв, Є. О. Застосування поверхонь відгуку при моделюванні сталого енергетичного розвитку міст [Текст] / Є. О. Адоньєв, В. М. Верещага // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2016. – № 3. – С. 471–476.
2. Балюба, І. Г. Точечное исчисление [Текст]: учеб. пос. / І. Г. Балюба, В. М. Найдьш; под ред. В. М. Верещаги. – Мелітополь: МГПУ ім. Б. Хмельницького, 2015. – 236 с.
3. Бумага, А. І. Точкове рівняння дуги параболи другого порядку [Текст] / А. І. Бумага // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – 2012. – № 90 – С. 49–52.
4. Верещага, В. М. Спосіб згортання (розгортання) шарунок [Текст] / В. М. Верещага, Є. О. Адоньєв, О. М. Павленко // Сучасні проблеми моделювання. – 2016. – № 7. – С. 32–38.
5. Верещага, В. М. Монофакторний принцип побудови моделі багатофакторних задач термомодифікації будівель [Текст] / В. М. Верещага, Є. О. Адоньєв // Сучасні проблеми моделювання. – 2016. – № 7. – С. 24–31.
6. Конопачий, Є. В. Геометричне моделювання алгебраїчних кривих та їх використання при конструюванні поверхонь у

- точковому численні Балюби-Найдьши [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01 / Є. В. Конопачий. – Мелітополь: ТДАТУ, 2012. – 26 с.
7. Кучеренко, В. В. Формалізовані геометричні моделі нерегулярної поверхні для гіперкілісної дискретної скінченної множини точок [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01 / В. В. Кучеренко. – Мелітополь, ТДАТУ, 2013 – 234 с.
8. Мартинов, В. Л. Моделювання оптимальних геометричних параметрів енергоефективних будівель гранної форми [Текст]: дис. ... Докт. Тех. Наук : 05.01.01 / в. Л. Мартинов. – Київ, 2015. – 390 с.
9. Нечволод, Л. І. Сучасний словник іншомовних слів [Текст] / Л. І. Нечволод. – Харків: Торсинг плюс, 2007. – 768 с.
10. Підгорний, О. Л. Актуальні проблеми геометричного моделювання в задачах енергозбереження у будівництві [Текст] / О. Л. Підгорний, В. О. Плоский, О. В. Сергійчук // Вентиляція, освітлення та теплозапобігання. – 2010. – № 14. – С. 25–31.

#### Bibliography (transliterated):

1. Adoniev, Ye. O., Vereshchaha, V. M. (2016). Zastosuvannya poverkhon vidhuku pry modeliuванні staloho enerhetychnoho rozvytku mist. Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, 3, 471–476.
2. Baliuba, Y. H., Naidysh, V. M., ed.: Vereshchaha V. M. (2015). Tochechnoe yschyslenye. Melitopol: MHPU ym. B. Khmelnytskoho, 234.
3. Bumaha, A. I. (2012). Tochkovye rivniannya duby paraboly druhogo poriadku. Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika, 90, 49–52.
4. Vereshchaha, V. M., Adoniev, Ye. O., Pavlenko, O. M. (2016). Sposib zhortannia (rozhortannia) charunok. Suchasni problemy modeliuвання, 7, 32–38.
5. Vereshchaha, V. M., Adoniev, Ye. O. (2016) Monofaktorny pryntsy pobudovy modeli bahatofaktornykh zadach termorenovatsii budivel. Suchasni problemy modeliuвання, 7, 24–31.
6. Konopatskyi, Ye. V. (2012). Heometrychne modeliuвання alhebraichnykh kryvykh ta yikh vykorystannia pry konstruiuvanni poverkhon u tochkovomu chyslenni Baliuby-Naidysya, Melitopol: TDAU, 163.
7. Kucherenko, V. V. (2013). Formalizovani heometrychni modeli nerehularnoi poverkhni dlia hiperkilisnoi dyskretnoi skinchenoi mnozhyny tochok, Melitopol: TDAU, 232.
8. Martynov, V. L. (2014). Modeliuвання optymalnykh heometrychnykh parametriv enerhoeffektyvnykh budivel hranoi formy. Kyiv, 390.
9. Nechvolod, L. I. (2007) Suchasnyi slovnyk inshomovnykh sliv. Kharkiv: Torsynh plus, 768.
10. Pidhornyi, O. L., Ploskiy, O. V. Sergejchuk, O. V. (2010) Aktualni problemy heometrychnoho modeliuвання v zadakhk enerhobzberzhennia u budivnytstvi. Ventyliatsia, osvittennia ta teplohazapostachannia, 14, 25–31.

Надійшла (received) 19.04.2017

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Розробка узагальненої техніки алгебраїчного формування Б-функцій для чотирьох точок/ Є. О. Адоньєв, В. М. Верещага, К. Ю. Лисенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С. 17–23.– Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Разработка обобщенной техники алгебраического формирования Б-функций для трех точек/ Е. А. Адоньєв, В. М. Верещага, К. Ю. Лысенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С. 17–23.– Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Development of a generalized technique for the algebraic formation of B-functions for four points/ Y. Adoniev, V. Vereshchaha, K. Lysenko //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 17–23. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459**

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Адоньєв Євген Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, декан Економіко-гуманітарного факультету Запорізького національного університету в м. Мелітополі; вул. Героїв України, 160А., м. Мелітополь, Україна, 72316; e-mail: [evgen.adoniev@gmail.com](mailto:evgen.adoniev@gmail.com).

**Верещага Віктор Михайлович** – доктор технічних наук, професор кафедри прикладної математики та інформаційних технологій Мелітопольського державного педагогічного університету ім. Богдана Хмельницького; вул. Гетьманська, 20, м. Мелітополь, Україна, 72300; e-mail: [vervik49@gmail.com](mailto:vervik49@gmail.com).

**Лисенко Ксенія Юрївна** – магістрант, кафедра прикладної математики та інформаційних технологій Мелітопольського державного педагогічного університету ім. Богдана Хмельницького; вул. Гетьманська, 20, м. Мелітополь, Україна, 72300; e-mail: [vervik49@gmail.com](mailto:vervik49@gmail.com).

**Адоньев Евгений Александрович** – кандидат технических наук, доцент, декан Экономико-гуманитарного факультета Запорожского национального университета в г. Мелитополье; ул. Героев Украины, 160А, г. Мелитополь, Украина, 72316, e-mail: [evgen.adoniev@gmail.com](mailto:evgen.adoniev@gmail.com).

**Верещага Виктор Михайлович** – доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и информационных технологий Мелитопольского государственного педагогического университета им. Богдана Хмельницкого; ул. Гетьманская, 20, г. Мелитополь, Украина, 72300; e-mail: [vervik49@gmail.com](mailto:vervik49@gmail.com).

**Лысенко Ксения Юрьевна** – магистрант, кафедра прикладной математики и информационных технологий Мелитопольского государственного педагогического университета им. Богдана Хмельницкого; ул. Гетьманская, 20, г. Мелитополь, Украина, 72300; e-mail: [vervik49@gmail.com](mailto:vervik49@gmail.com).

**Adoniev Yvhen** – PhD, associate professor, dean of the Economics and Humanities Faculty of the Zaporizhzhya National University in Melitopol. Heroiv Ukrainy str., 160A, Melitopol, Ukraine, 72316.

**Vereshchaga Viktor** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Applied Mathematics and Information Technologies of the Melitopol State Pedagogical University named after Bohdan Khmelnytsky; Getmansky str., 20, Melitopol, Ukraine, 72300; e-mail: [vervik49@gmail.com](mailto:vervik49@gmail.com).

**Lysenko Ksenia** – Master of Science, Department of Applied Mathematics and Information Technologies of the Melitopol State Pedagogical University named after Bohdan Khmelnytsky; Getmansky str., 20, Melitopol, Ukraine, 72300; e-mail: [vervik49@gmail.com](mailto:vervik49@gmail.com).

УДК 621.397.48 : 004.932.2

**А. В. БЕЛЯЕВ, О. В. ЗУБКОВ, К. С. ТАРАСОВ, В. М. КАРТАШОВ**

## ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В УНИВЕРСАЛЬНОМ МУЛЬТИМЕДИЙНОМ СТРЕЛКОВОМ ТРЕНАЖЕРЕ

Методом теории статистических решений в статье синтезированы оптимальные алгоритмы обработки сигналов в мультимедийном стрелковом тренажере. В статье приводится краткий анализ моделей сигналов и помех, которые встречаются в рассматриваемой системе. В ходе статьи был предложен алгоритм оптимального обнаружения «пробоины», полученной в результате воздействия стрелкового оружия, или обнаружения светового пятна, образуемого лучом лазерного имитатора оружия. Синтезированный оптимальный алгоритм позволяет формировать максимально правдоподобные оценки пространственных координат центра светового пятна или пробоины на экране стрелкового комплекса.

**Ключевые слова:** обработка изображений, алгоритмы слежения, распознавание образов, оптимальное обнаружение, стрелковый тренажер.

Методом теорії статистичних рішень в статті синтезовані оптимальні алгоритми обробки сигналів в мультимедійному стрілецькому тренажері. У статті наводиться короткий аналіз моделей сигналів і перешкод, які зустрічаються в даній системі. В ході статті був запропонований алгоритм оптимального виявлення «пробоїни», отриманої в результаті впливу стрілецької зброї, або виявлення світлового плями, утвореного променем лазерного імітатора зброї. Синтезований оптимальний алгоритм дозволяє формувати максимально правдоподібні оцінки просторових координат центру світлової плями або пробоїни на екрані стрілецького комплексу.

**Ключові слова:** обробка зображень, алгоритми стеження, розпізнавання образів, оптимальне виявлення, стрілецький тренажер.

By the method of the theory of statistical solutions, optimal algorithms for signal processing in a multimedia rifle simulator are synthesized in the article. The article provides a brief analysis of the signal and interference patterns that are encountered in the system under consideration. In the course of the article, an algorithm was proposed for the optimal detection of a "hole", obtained as a result of the impact of small arms, or the detection of a light spot formed by a laser imitator beam of a weapon. The synthesized optimal algorithm allows to form the most plausible estimates of the spatial coordinates of the center of the light spot or holes on the screen of the shooting

**Keywords:** image processing, tracking algorithms, IMAGE recognition, optimal detection, shooting trainer.

**Введение.** При обработке и анализе изображений встречаются задачи обнаружения фрагмента с известными параметрами (фрагмент – элемент изображения, содержащий искомый объект, символ и т.п.), а также задачи измерения пространственных координат таких фрагментов [1]. Существует значительное количество методов решения подобных задач, основанных на фильтрации изображений [2], корреляционной обработке [3, 4], на использовании искусственных нейронных сетей и методов нечеткой логики и так далее. Однако, вычислительная эффективность и результаты решения задач обнаружения этими методами не идентичны.

К системам, в которых решаются подобные задачи обнаружения и измерения, относятся мультимедийные стрелковые тренажеры [5,6]. В них на фоне изменяющегося и, чаще всего, неоднородного видео-изображения проводится поиск мелкомасштабных объектов – пулевых отверстий. Мультимедийные стрелковые тренажеры, называемые «универсальными», обеспечивают работу системы в двух режимах: боевом, с использованием реального или пневматического оружия, и в режиме имитации стрельбы, с использованием лазерных насадок.

© А. В. Беляев, О. В. Зубков, К. С. Тарасов, В. М. Карташов.  
2017