

## 183 ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 504.05:62-577.3:536.7

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351065

### ЕНТРОПІЙНИЙ ФАКТОР У ПРОЯВІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОРГАНІЧНИХ І НЕОРГАНІЧНИХ СИСТЕМ НА МЕЖІ СПІВІСНУВАННЯ ЛЮДИНИ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

- Волошин В.С.** д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-2663>, e-mail: [vsvlshn52@gmail.com](mailto:vsvlshn52@gmail.com);
- Азархов О.Ю.** д-р мед. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0062-0616>, e-mail: [azarhov\\_a\\_y@pstu.edu](mailto:azarhov_a_y@pstu.edu)

У даній роботі зроблена спроба вивчити межу між органічною і неорганічною речовинами в зоні їх зіткнення в штучних системах, створених людиною. Такі системи в роботі умовно названі ES-системами, а їх компоненти «Org» і «InOrg» є підсистемами, межа взаємодії яких має характер співіснування або конфлікту, в залежності від умов досліджуваної взаємодії. За основу критерія такої взаємодії прийнята ентропія ES-системи, що обчислюється або визначається експериментально, в залежності від умов досліджуваної взаємодії. Встановлено, що на межі двох граничних підсистем у штучних ES-систем виникає термодинамічний потенціал у вигляді діапазону зміни ентропії для цих середовищ. Запропонована область перехідних процесів, пов'язаних зі зміною ентропії на умовній межі біологічної та неорганічної складових в найрізноманітніших варіантах, актуальних у зв'язку з розвитком потреб людини, має певні синергетичні властивості, що впливають на їх співіснування. При цьому органічна складова прагне до стану термодинамічної рівноваги, а неорганічна – до нерівноважного стану, таким чином, що виник перехідний процес, здатний характеризувати стійкість системи ЕС, а значить і здатність до запрограмованих станів, що забезпечують їх працездатність. Розглянуто деякі найбільш поширені ES-системи на основі біологічних та неорганічних компонентів, і на основі власних розрахунків, а також наявності результатів у літературі, зроблено спробу узагальнити закономірності таких перехідних процесів у салузі термодинаміки ES-систем як показника їх ефективності. Показано, що мінімальний діапазон зміни ентропії між «InOrg» та «Org» є основою функціональної координованої взаємодії в системах ES. Встановлено, що на межі двох середовищ – органічного та неорганічного, як двох граничних підсистем, у штучних ES-системах виникає термодинамічний потенціал у вигляді діапазону змінної ентропії. Мінімальна термодинамічна неупорядкованість між «InOrg» і «Org» лежить в основі функціональної координованої взаємодії в ES-системах і їх системних властивостях. До таких та подібних ним якостей у вже відомих ES-системах належать, зокрема, підвищена механічна міцність імплантатів, висока каталітична активність на межі органіки і неорганіки, висока селективність органічних напівпровідників і органічних світлодіодів, здатність модифікувати поверхні неорганічної речовини за допомогою органічних молекул, що розпилюються, та ін.

**Ключові слова:** біологічна система, неорганічна система, навколишнє середовище, граничні взаємодії, ентропія, перехідні процеси, стійкість.

#### Постановка проблеми

Розвиток інформаційних технологій, спрямування до технологічного об'єму 5.0 покладає на людину створення додаткових відносин із штучним інтелектом, різноманіттям технологічних процесів, у тому числі інтелектуально розвинених, глобальним інформаційним простором та різноманіттям надскладних мережесистем. Такі відносини викликають гостру дискусію про роль і місце людини в сучасному технологізованому світі, перспективи його розвитку і навіть існування. Потрібні більш точні і універсальні критерії для оцінки можливостей сучасного неорганічного світу, який все більше втручається в існування не тільки людини, але й інших складових органічного світу планети.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Співіснування двох, дещо протилежних, світів давно стало сучасною даністю. Це вуглецево-білковий світ, до якого відноситься і людина як об'єкт природи, та неорганічний світ кремнію і заліза, який в своїй штучній частині є продуктом людської діяльності. Людина – єдиний суб'єкт, який не тільки відноситься до цих двох світів, але і об'єднує їх. І, в той же час, розділяє. У зв'язку з цим представляє інтерес прикордонна частина співіснування цих досить різних за властивостями і призначенням систем.

У літературі накопичено багатий досвід теоретичних досліджень в області співіснування живої і неживої матерії. Це й теорія дисипативних структур І. Пригожина [1], згідно з якою живі системи використовують термодинамічно нерівноважні стани для створення порядку шляхом взаємодії з неорганічним

середовищем (наприклад, фотосинтез і сонячні батареї). Це гіпотеза аутопоеза Ж. Матурана і Ф. Вареля [2]: жива матерія самоорганізується і самовідтворюється, тоді як неорганічна матерія потребує зовнішнього контролю (імплантати в організмі). Концепція ексергії І. Дінцера [3] відображає однофункціональне перетворення енергії, з тією різницею, що жива система оптимізує ексергію для зростання, а неорганічна система оптимізує ексергію для рівноваги (мозок проти ШІ). Теорія симбіогенезу Л. Маргуліса [4] опосередковано пов'язана з темою пограниччя, підкреслюючи, що його властивості і синергізм (наприклад, біомінералізація) виникають в результаті співпраці органічного і неорганічного.

Прикордонна система між живою (вуглецево-білковою) і неживою (неорганічною) природою виникає там, де органічні і неорганічні системи тісно взаємодіють, виконуючи схожі функції і є дуже умовною. Описати цей феномен допомагають сучасні теорії, такі як теорія самоорганізації [5], біокібернетика, поняття ексергії.

#### Мета статті

Вивчити закономірності на межі двох середовищ – органічного та неорганічного в екологічних системах, створених людиною, з метою визначення їх стійкості та злагодженого існування.

#### Виклад основного матеріалу

Розглядаючи прикордонну зону між органічними і неорганічними середовищами, ми будемо називати її «прикордонною системою або *Edge System* – *ES*». А двома її складовими є підсистеми «*InOrg*» і «*Org*», що означає «*InOrganic*» і «*Organic*». Це легко записати у вигляді пояснювальної формули ( $ES = IO + O$ ). До найбільш поширених типів граничних *ES*-систем відносяться:

- мозок та штучний інтелект (ШІ);
- імплантати в живу тканину;
- фотосинтез і неорганічні джерела енергії;
- урбосистема і навколишнє природне середовище;
- ентропія в живому і неорганічному середовищі та ін.

Деякі узагальнені характеристики якостей таких систем представлені в таблиці 1.

Ми будемо звертати увагу на ті властивості граничних зон, які є узагальнюючими і незалежними окремо від змісту «*Organic*» і «*InOrganic*». Наприклад, це може бути властивість взаємного проникнення двох різних частин, що визначається коефіцієнтом  $\mu$  (%). Або енергетичні взаємодії, які пов'язані з прикордонними зонами.

Таблиця 1  
Деякі узагальнені якості вуглецево-білкового і неорганічного світів

Якісна характеристика системи	Вуглецево-білковий світ	Неорганічний Світ
Структура	Самоорганізована, Ієрархічна	Кристалічна, аморфна, статична
Енергія	Хімічна (АТФ, глюкоза)	Електрична, механічна, теплова
Ентропія	Зниження локальної за рахунок зовнішньої	Зростання загальної, як результат дисипації
Адаптація	Висока (еволюція, навчання)	Низка (фіксована конструкція)
Швидкість процесів	Повільна, біологічна	Швидка, фізична
Довголіття	Обмежена (старіння)	Висока (стійкість матеріалів)

Область взаємного проникнення в прикордонну зону і пов'язаний з нею коефіцієнт  $\mu$  показують ту частину простору *ES*-системи, до якої відносяться ті чи інші специфічні якості означених частин цієї системи і загальні для них властивості самої системи. Значення  $\mu$  для кожного з них буде істотно відрізнятися і показувати ступінь впливу однієї частини на іншу і взаємно. Наприклад, система «урбосистема-навколишнє середовище» – це область взаємного проникнення фауни і флори на територію міста, з одного боку, і заміські культурні насадження, дачні ділянки, системи електропередачі, сміттєзвалища, з іншого. Для системи «мозок-штучний інтелект» така межа більше спрямована на впровадження людського мозку в створювані ним системи штучного інтелекту, ніж навпаки, наприклад, нейроінтерфейси, такі як *Neuralink*, *Synchron*, *NeuroPace* тощо [6]. Коефіцієнт  $\mu$  є досить розпливчастим параметром. Він залежить від властивостей двох частин *ES*-системи і буде унікальним в кожному конкретному випадку. Тому його процентне співвідношення – це можливість для якісного аналізу властивостей самої системи.

На окрему увагу заслуговує така властивість *ES*-системи, як її енергетичний потенціал. Дві далеко не рівнозначні складові цієї системи «*Org*» і «*InOrg*», в залежності від їх змісту, мають різні електричні або дифузійні потенціали, різну концентрацію речовини на межі розділу середовищ, різні теплові коефіцієнти, градієнти температури і маси, нарешті, втрати енергії. Все це дозволяє судити про певний особливий енергетичний стан *ES*-систем як про їх значущу якість.

У даній роботі ми розглянемо, як змінюється ентропія досліджуваних систем на межі їх взаємодії в залежності від ступеня взаємного проникнення  $\mu$ . Розрахункова динаміка змін ентропії для таких об'єктів, як *ES*-системи, дуже специфічна і вимагає певного

аналізу в зв'язку з низькою уніфікацією об'єктів аналізу. Наведемо низку прикладів.

*ES*-систему, що включає урбосистему, як представника «*InOrg*», і навколишній біологічний світ природи, віднесений до «*Org*», слід розглядати як систему з можливістю імпорту з навколишнього середовища низькоентропійних ресурсів, таких як енергія, товари і сировина, а також експорту високоентропійних ресурсів у вигляді відходів, тепла і забруднення. Це відповідає концепції дисипативних систем, де внутрішній порядок підтримується за рахунок наростаючого безладу в надсистемі. Така система відноситься до термодинамічно відкритих, в яких підсистема «*Org*» слабо нерівноважна або навіть рівноважна, а підсистема «*InOrg*» позиціонується як термодинамічно сильно нерівноважна. Тому при розрахунку ентропії в граничному шарі *ES*-системи будемо використовувати рівняння Л. Онсагера в узагальненому вигляді в першому випадку  $\Delta S = \sum J_a X_a$  (стан слабкої нерівноважності на межі рівноважного стану), де  $J_a$  – матеріальні потоки,  $X_a$  – термодинамічні сили такі, що  $J_a = \sum L_a X_a$ , а  $L_a$  – феноменологічний коефіцієнт. А в другому випадку – рівняння Пригожина про зміну ентропії в сильно нерівноважних системах:  $\frac{dS_0}{dt} = \sum \frac{J_a X_a}{T_a}$ ; теорема про якість ентропії  $\frac{dS_{tot}}{dt} = \frac{dS_{int}}{dt} + \frac{dS_{ext}}{dt} \geq 0$ , де  $S_{tot}$  – повна ентропія,  $S_{int}$  – внутрішня ентропія,  $S_{ext}$  – зовнішня ентропія.

В залежності від заданих вихідних умов: зміни теплового режиму на кордоні підсистем, температурного режиму і кількісної потужності штучних споруд і систем в «*InOrg*» для середньостатистичного міста США з населенням в 1 млн осіб і енергоспоживанням 10 ТВт·год ( $9,86 \cdot 10^{13}$  Дж/сут. при середній температурі навколишнього середовища 288 К (15°C), розрахуємо значення ентропії для *ES*-системи «урбосистема – навколишнє середовище». Додаткові дані для оцінкового розрахунку (можуть змінюватися в залежності від щільності населення, економічної структури та клімату), а саме:

- задана площа міста – 700 км<sup>2</sup>;
- середня ширина рекреаційної зони навколо міста – 10 км;
- орієнтовна кількість і вага всіх будівель і споруд в місті – 250 тисяч ( $10^9$  т)
- маса всіх промислових систем в місті –  $5 \cdot 10^6$  т;
- передбачувані матеріальні потоки, що спрямовуються в місто (товари, сировина) –  $2,74 \cdot 10^4$  т/добу;
- передбачувані матеріальні потоки, що вивозяться з міста (відходи, матеріали, забруднення) –  $2,74 \cdot 10^4$  т/добу;
- градієнти температури і концентрації в *ES*-системі;
- теплові потоки, що залишають місто –  $9,86 \cdot 10^{10} \frac{\text{кДж}}{\text{добу}}$ ;

- встановлена концентрація пилу в місті –  $4,5 \cdot 10^{-5}$  г/м<sup>3</sup>;
- типова біомаса для лісів – 135 т/га, для степів – 4 т/га;
- орієнтовна зелена маса лісів та степів навколо міста –  $2,92 \cdot 10^7$  т
- задана площа водних об'єктів навколо міста –  $7 \cdot 10^7$  м<sup>2</sup>;
- заданий обсяг повітря (задана висота шару в 10 км), здатний впливати на стан атмосфери в місті –  $7 \cdot 10^{12}$  м<sup>3</sup>;
- концентрація пилу в зоні навколо міста –  $1,5 \cdot 10^{-5}$  г/м<sup>3</sup>;
- встановлена ступінь поглинання пилу і газів в навколишньому середовищі становить 20%;
- енергія фотосинтезу зеленої маси навколо міста –  $2,35 \cdot 10^{14} \frac{\text{Дж}}{\text{год}} = 6,4 \cdot 10^{11} \frac{\text{Дж}}{\text{добу}}$ ;

Параметричний діапазон взаємного проникнення  $\mu$  вимірюється в кілометрах.

Результати дослідження деяких термодинамічних параметрів, що зв'язують області *ES*-системи з її синергетичними властивостями, представлені на рис. 1.

Як і очікувалося, підсистема «*Org*» має більш низькі значення ентропії. Вона включає в себе також мінливі умови теплового режиму поблизу від насичених теплом урбосистем, від вихідних температурних параметрів яких дуже залежать органіка, зокрема, кліматичні ефекти, біогеохімічні цикли. Для підсистеми «*Org*» передбачувана ентропія складається з:  $S_{Org} \approx +(0,226 \div 0,461) \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с})$  для екосистем, таких як листяні ліси, річки та озера;  $S_{Org} \approx -0,422 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с})$  – для замських пасовищ, де обмінні процеси більш складні.

Використовуючи збережені дані, покажемо, що щорічна зміна ентропії  $\Delta S_{NonOrg} \approx +1,25 \cdot 10^{14} \text{ Дж}/\text{К}$  або  $\approx +3,42 \cdot \frac{10^{11} \text{ Дж}}{\text{К} \cdot \text{добу}} \approx +0,0198 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{с})$  і показує на деградацію граничної області *ES*-системи. В цілому ми бачимо стрибок ентропії на кордоні *ES*-системи (див. рис. 1). Урбосистема, яка готова до збільшення організованості, пригнічує навколишнє середовище, яке, в свою чергу, здійснює спротив особистій дезорганізації. Можливий варіант, коли внутрішня ентропія урбосистеми стає негативною або близькою до нуля, оскільки місто підтримує власний порядок за рахунок імпорту ресурсів.

Однак загальний баланс завжди позитивний, так як завжди включає експорт ентропії в природу, необхідний для підтримки структури самої урбосистеми. У свою чергу, природа приймає зростання ентропії, що проявляється в її забрудненні, появі острівців тепла та інших формах деградації. «Теплові острови» змінюють місцевий клімат, збільшуючи ентропію через розсіювання тепла.

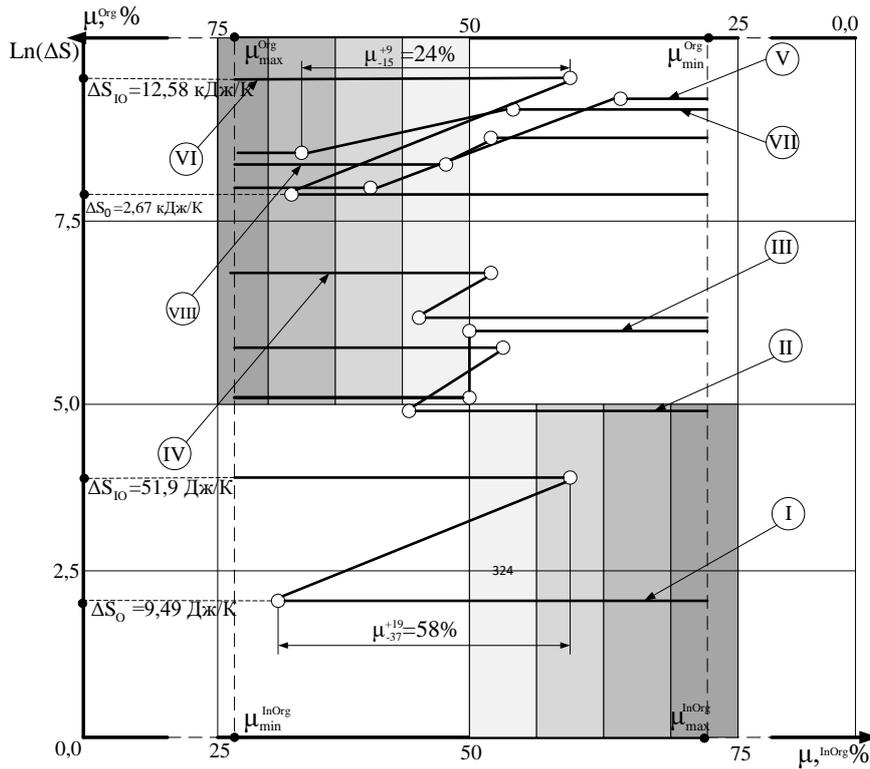


Рис. 1 – Межі зміни ентропії в деяких ES-системах в залежності від параметра  $\mu$ . (Тут ентропія, що записана через натуральний логарифм, вимірюється в Дж/К)

Ще одна специфічна ES-система, яка описує граничну область, це та, в якій співіснують системні якості людського мозку і штучного інтелекту. Вона несе в собі якості мінливої термодинамічної ентропії ( $\Delta S$ ), що визначається через енергію, що споживається як мозком, так і технічними системами, що забезпечують функціонування штучного інтелекту, відповідно, яка описує дві підсистеми «Org» і «InOrg», виходячи з їх функціонального призначення [6]. Перша частина розраховується за відомими формулами С. Больцмана, а друга пов'язана з формулою К. Шеннона, з подальшим порівнянням фізичних величин за відомою методикою, де  $S[\text{Дж/К}] = k \cdot \ln(2^H) = 0,956 \cdot 10^{-23} H$ , де  $H$  вимірюються в бітах.

Наведемо основні вихідні дані для розрахунку ентропії для ES-системи «мозок-штучний інтелект». Для мозку це:

- споживана потужність 20 Вт (метаболічне споживання);
- робоча температура 310 К;
- швидкість обробки інформації 10 біт/с (для когнітивних завдань до 20 біт/с).

Для штучного інтелекту:

- споживана потужність 100-1000 Вт;
- робоча температура 300 К;
- швидкість обробки інформації, залежить від поставленого завдання ( $10^{15}$  1/с).

Параметричний діапазон взаємного проникнення  $\mu$  вимірюється в бітах інформації.

У самому приблизному вигляді розрахунки підтверджують, що для 86 мільярдів нейронів в мозку людини при споживанні близько 20 Вт зовнішньої енергії відбувається збільшення ентропії  $\Delta S_{Org} = +5,6 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{добу}} = +64 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{с}}$ , а інформаційна ентропія мозку при швидкості обробки даних  $10^{15}$  операцій в секунду  $H_{Org} = +0,8 \cdot 10^9$  бит або  $+0,76 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{добу}} = +6,910^{-20} \frac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{с}}$ . Для технічної системи, що забезпечує роботу штучного інтелекту (задана потужність 100-1000 Вт) з розмірністю 32 біта, в залежності від обсягу ( $10^9$  параметрів), а також структури даних і використовуваних алгоритмів, опосередковані дані мають такий вигляд:  $\Delta S_{InOrg} = +7,8 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{длбу}} = +9,02 \frac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{с}}$ , тобто на порядки вище, а інформаційна ентропія при швидкості обробки інформації  $10^{17}$  операцій в секунду  $H_{InOrg} = +32 \cdot 10^9$  бит або  $+30,6 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{добу}} = 3,5 \cdot 10^{-18} \frac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{с}}$ .

Перехідний характер зміни ентропії в таких ES-системах очевидний, а сама перехідна функція може бути не тільки гладкою, але навіть бінарною, що відображає невизначеність в ES-системі при такому перехідному процесі. Слід зазначити, що процедури

вивчення ентропії для *ES*-систем дуже складні, і в кожному варіанті досліджуваної *ES*-системи вимагає свого персонального підходу. Тим не менш, такі розрахунки можна привести до засвоюваного результату, який дозволить ефективно проаналізувати ці дані.

На рисунку 1 показані інші області для  $\mu$ , де мають вигоди специфічні властивості деяких *ES*-систем, що описані в таблиці 2 і складаються з двох підсистем: «*InOrg*» і «*Org*». Перетин ентропії при переходах в області *ES*-системи може відбуватися як поступово – від «*InOrg*» до «*Org*», так і навпаки, від «*Org*» до «*InOrg*» і по низхідній, в тому ж порядку. Це по різному може характеризувати кожну з *ES*-систем. Наприклад, *ES*-система «мозок-штучний інтелект» характеризується

низхідним вектором стрибка зміни ентропії в бік підсистеми «*Org*», в якій підсистема «*InOrg*» схильна до великих змін ентропії ( $\Delta S_{InOrg} = +51,9$  Дж/(кгК)), як менш організована, ніж мозок ( $\Delta S_{Org} = +9,49$  Дж/(кгК)). Тобто в *ES*-системі очевидні переваги органічного над неорганічним.

Розглянуті таким же чином *ES*-системи, позначені на рис. 1 як II, III, IV, показують такі ж самі результати. Їх відмінною рисою є те, що в ній бере участь людина, як підсистема «*Org*», на відміну від *ES*-систем, де участь людини або опосередкована, або має іншу органічну складову (поз. V, VI, VII, VIII на рис. 1).

Таблиця 2

Перехідні процеси в змінах ентропії на межі органічних і неорганічних систем

№№ п/п	ES-система: « <i>Org</i> » « <i>InOrg</i> »	Діапазон зміни ентропії, Дж/(кгК)	Діапазон зміни коефіцієнта $\mu$ , %	Вектор напрямлення зміни ентропії	
				Зріст ентропії ES-системи	Зменшення зросту $\Delta S$
I	«O» - мозок; «IO» - штучний інтелект.	9,49÷51,9	$\mu_{-37}^{+19} = 56$	-	+
II	«O» -біолог. тканина «IO»- імпланти	141,2÷361,4	$\mu_{-5,5}^{+3} = 8,5$	-	+
III	Біомінералізація «O» - біолог. тканина «IO» - мінерали	165,7÷518,0	$\mu_{-0}^{+0} \approx 0$	+	-
IV	«O» - ензими «IO»-каталізатори	601,8÷1043,1	$\mu_{-5,2}^{+3,0} = 8,2$	-	+
V	«O»-біоенергія «IO»-штучна енергія	3294÷8955	$\mu_{-9}^{+13,5} = 22,5$	+	-
VI	«O»-навк.прир.серед. «IO»- урбосистема	2670÷12580	$\mu_{-15}^{+9} = 24$	-	+
VII	«O»-біомембрана «IO»-фільтр	4023÷9996	$\mu_{-14}^{+4} = 18$	+	-
VIII	Нановироби «O»-орган.компон. «IO»-неорг. компонент.	3133÷4675	$\mu_{-2,5}^{+2,1} = 4,6$	+	-

Для деяких *ES*-систем можуть спостерігатися взаємно протилежні тенденції. Наприклад, для *ES*-системи «нанотехнології», переважне зростання ентропії стосується до неорганічної складовій «*InOrg*» ( $\Delta S = +4447$  Дж/(кгК)), а її органічна складова показує на спрямованість до відносно більшої організованості, що має вираз у мінімізації зростання її ентропії ( $\Delta S = +3294$  Дж/(кгК)). Більш того, як показують графіки I, II, IV, VI, в разі активної участі людини в таких системах їх стан стає явно більш стійким, а термодинамічно нерівноважна *ES*-система прагне до впорядкованості і підлягає відповідним дослідженням. В інших випадках для *ES*-системи характерне зростання інтегральної ентропії або прагнення до термодинамічної рівноважності.

Ми маємо справу з деякою новою якістю *ES*-систем, яка не описана в доступній літературі. Ентропійні перехідні процеси в певному розрізі живого та неживого можуть вказувати на певні зміни в стійкості *ES*-системи, її відношенні до термодинамічної рівноважності, спрямованості деяких процесів. Вони можуть бути пов'язані з якісними змінами співвідношення «*Org*» та «*InOrg*» в області фізичного або інформаційного розділу. Можливо, ця якість носить системний характер. У цьому випадку особливості або закономірності *ES*-системи можуть стати джерелом нових знань про природу людської діяльності, яка сама, будучи похідною від біологічного світу, створила свій специфічний неорганічний світ, який здатний конкурувати, і вже конкурує, з біологічним світом, здатний

співіснувати з ним, в залежності від таких унікальних властивостей, що знаходяться на кордоні цих двох світів.

Серед відомих синергетичних властивостей, що виникають в *ES*-системах, відзначимо ті, які характеризуються різким перехідним процесом при незначних змінах ентропії між шарами «*Org*» і «*InOrg*» *ES*-систем.

До них відносяться, наприклад, деякі біокаталітичні системи з адсорбцією пропану на цеолітах, такі, що різкі перехідні процеси при зміні ентропії коливаються від 47,7 до 103,8 Дж/(моль·К) при ступені адсорбції 3% (дані отримані в результаті експериментів і термодинамічних розрахунків [7]).

До наступних синергетичних властивостей, що пов'язані з *ES*-системами для відомих органічних і неорганічних кластерів, що взаємодіють, можна віднести підвищену механічну міцність на межі органічних і неорганічних матеріалів, наприклад, кісткових з'єднань [8]. Підтверджені дані показують, що перехідний процес між ентропійними станами в такій *ES*-системі найменше складає -0,34 Дж/(кг·К) в напрямку зниження ентропії.

Експериментально підтверджена амплітуда перехідного процесу, пов'язана зі станом ентропії на кордоні біологічної *ES* - системи «ліганд-платина» досить висока в діапазоні +(1682.1÷3045.6) Дж/(кг·К).

Далеко не для всіх перерахованих вище властивостей можна знайти опубліковані дані про встановлені перехідні процеси для ентропії на кордоні «*InOrg*» і «*Org*» в якості аргументу на користь ефекту *ES*-систем в зв'язку зі складністю відповідних досліджень. Як правило, цьому повинні передувати реальні експерименти. Тим не менш, системні властивості *ES*-систем що знаходяться на межі двох підсистем «*InOrg*» і «*Org*», у багатьох випадках підтверджуються і мають право на існування.

### Висновки

1. Встановлено, що на межі двох середовищ – органічного та неорганічного, як двох граничних підсистем, у штучних *ES*-системах виникає термодинамічний потенціал у вигляді діапазону змінної ентропії. Як правило, такі перехідні процеси дають уявлення про нові цікаві властивості систем, що їх створюють, а саме про можливість виникнення синергетичних явищ в

області стійкості цих співіснуючих і конкуруючих систем в їх найбільшій різноманітності.

2. Мінімальна термодинамічна невпорядкованість між «*InOrg*» і «*Org*» лежить в основі функціональної координованої взаємодії в *ES*-системах і їх системних властивостях.

3. До таких якостей у вже відомих *ES*-системах належать, зокрема, підвищена механічна міцність імплантатів, висока каталітична активність на межі органіки і неорганіки, висока селективність органічних напівпровідників і органічних світлодіодів, здатність модифікувати поверхні неорганічної речовини за допомогою органічних молекул, що розпиляються, та ін.

### Перелік використаних джерел

- [1] Prigogine I., Stengers I. Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature. London: Heinemann, 1984. 349 p.
- [2] Maturana H. R., Varela F. J. Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living. Dordrecht: D. Reidel Publishing, 1980. 141 p.
- [3] Dincer I., Rosen M. A. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. 576 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2010-0-68369-6>.
- [4] Margulis L. Symbiosis in Cell Evolution. 2nd ed. New York: W.H. Freeman, 1993. 452 p.
- [5] Nicolis G., Prigogine I. Exploring Complexity: An Introduction. New York: W.H. Freeman and Company, 1989. 313 p.
- [6] Волошин В. С., Азархов О. Ю. Конкуренція та перспективи білково-вуглецевих та специфічних неорганічних екосистем на Землі. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2024. Вип. 48. С. 111-120. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310695>.
- [7] Time distribution of adsorption entropy of gases on heterogeneous surfaces by reversed-flow gas chromatography / N. A. Katsanos et al. *Journal of Chromatography A*. 2006. Vol. 1127, iss. 1-2. Pp. 221-227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2006.05.067>.
- [8] Crystallinity and solubility characteristics of hydroxyapatite adsorbed amino acid / T. Matsumoto et al. *Biomaterials*. 2002. Vol. 23, iss. 10. Pp. 2241-2247. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(01\)00358-1](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(01)00358-1).

## ENTROPY FACTOR IN THE MANIFESTATION OF PROPERTIES OF ORGANIC AND INORGANIC SYSTEMS ON THE BORDER OF COEXISTENCE BETWEEN MAN AND THE ENVIRONMENT

**Voloshyn V.S.**

*D.Sc. (Engineering), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-2663>, e-mail: [vsvlshn52@gmail.com](mailto:vsvlshn52@gmail.com);*

**Azarkhov A.Yu.**

*D.Sc. (Medical Sciences), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0062-0616>, e-mail: [azarhov\\_a\\_y@pstu.edu](mailto:azarhov_a_y@pstu.edu)*

*In this work, an attempt is made to study the boundary area between organic and inorganic matter in the area of their contact in artificial systems created by man. Such systems are conventionally called ES-systems, and their components «Org» and «InOrg» are subsystems, the boundary of interaction of which is of the nature of coexistence or conflict, depending on the conditions of the interaction under study. The conditions for thermodynamic relations in the boundary region of the ES system are determined, and, depending on the degree of thermodynamic disequilibrium, the entropy of each of the subsystems is determined. It has been established that at the boundary of two boundary subsystems, a thermodynamic potential arises in artificial ES systems in the form of a range of changing entropy for these environments. The area of transient processes associated with changes in entropy at the conditional boundary of the biological and inorganic worlds in a variety of variants relevant in connection with the development of human needs is considered, and has certain synergetic properties that affect their existence. To characterize the stability of the ES system, and hence the ability to programmatic states that ensure their operability. The most common ES systems based on biological and inorganic components are considered, and on the basis of our own calculations, as well as the data available in the literature, an attempt is made to generalize the regularities of such transient processes in the field of thermodynamics of ES systems as an indicator of their efficiency. It is shown that the minimal thermodynamic disorder between «InOrg» and «Org» is the basis of functional coordinated interaction in ES systems. It has been established that at the boundary of two media - organic and inorganic, as two boundary subsystems, a thermodynamic potential arises in the form of a range of variable entropy in artificial ES systems. The minimal thermodynamic disorder between «InOrg» and «Org» underlies the functional coordinated interaction in ES systems and their system properties. Such and similar qualities in already known ES systems include, in particular, increased mechanical strength of implants, high catalytic activity at the interface of organic and inorganic, high selectivity of organic semiconductors and organic LEDs, the ability to modify the surfaces of inorganic matter using atomized organic molecules, etc.*

**Keywords:** biological system, inorganic system, environment, boundary interactions, entropy, transients, stability.

#### References

- [1] I. Prigogine, and I. Stengers, *Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*. London, UK: Heinemann, 1984.
- [2] H.R. Maturana, and F.J. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*. Dordrecht, Netherlands: D. Reidel Publishing, 1980.
- [3] I. Dincer, and M.A. Rosen, *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*, 2nd ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2013. doi: [10.1016/C2010-0-68369-6](https://doi.org/10.1016/C2010-0-68369-6).
- [4] L. Margulis, *Symbiosis in Cell Evolution*, 2nd ed. New York, USA: W.H. Freeman, 1993.
- [5] G. Nicolis, and I. Prigogine, *Exploring Complexity: An Introduction*. New York, USA: W.H. Freeman and Company, 1989.
- [6] V.S. Voloshyn, and A.Yu. Azarkhov, "Konkurentsiia ta perspektyvy bilkovo-vuhletsevykh ta spetsyfichnykh neorhanichnykh ekosystem na Zemli" ["Competition and perspectives of protein-carbon and specific inorganic ecosystems on Earth"], *Visnyk Pryazovs'koho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Serii: Tekhnichni Nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 48, pp. 111-120, 2024. doi: [10.31498/2225-6733.48.2024.310695](https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310695).
- [7] N.A. Katsanos et al., "Time distribution of adsorption entropy of gases on heterogeneous surfaces by reversed-flow gas chromatography," *Journal of Chromatography A*, vol. 1127, iss. 1-2, pp. 221-227, 2006. doi: [10.1016/j.chroma.2006.05.067](https://doi.org/10.1016/j.chroma.2006.05.067).
- [8] T. Matsumoto, M. Okazaki, M. Inoue, Y. Hamada, M. Taira, and J. Takahashi, "Crystallinity and solubility characteristics of hydroxyapatite adsorbed amino acid," *Biomaterials*, vol. 23, iss. 10, pp. 2241-2247, 2002. doi: [10.1016/S0142-9612\(01\)00358-1](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(01)00358-1).

Стаття надійшла 30.10.2025

Стаття прийнята 27.11.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

**Цитуйте цю статтю як:** Волошин В.С., Азархов О.Ю. Ентропійний фактор у прояві властивостей органічних і неорганічних систем на межі співіснування людини та навколишнього середовища. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 151-157. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351065>.