

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.;

Азархов О. Ю., д-р. мед. наук, доц.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь - Дніпро, Україна

ПЕРЕХІДНІ ЕНТРОПІЙНІ ПРОЦЕСИ НА МЕЖІ ВЛАСТИВОСТЕЙ У ДЕЯКИХ ЕКОСИСТЕМАХ

У літературі накопичено багатий досвід теоретичних досліджень в області співіснування живої і неживої матерії в межах таких частин екосистеми, як «людина-машина» або «технічна система-навколишнє середовище». Це й теорія дисипативних структур І. Пригожина [1], згідно з якою живі системи використовують термодинамічно нерівноважні стани для створення порядку шляхом взаємодії з штучним неорганічним середовищем (наприклад, фотосинтез або сонячні батареї). Концепція ексергії І. Дінцера [2] відображає однофункціональне перетворення енергії, з тією різницею, що здатна оптимізувати ексергію для зростання, а машина, як неорганічна система оптимізує ексергію для рівноваги (система мозок проти ШІ). Теорія симбіогенезу Л. Маргуліса [3], у прикладі до системи «людина-машина» опосередковано пов'язана з темою пограниччя, підкреслюючи, що його властивості і синергізм виникають в результаті співпраці органічного і неорганічного.

Розглядаючи прикордонну зону між органічними і штучними неорганічними середовищами в таких частинах екосистеми, як «людина-машина», або «технічна система-навколишнє середовище» ми будемо називати їх «прикордонною системою або *Edge System* - *ES*». А двома її складовими вважатимемо підсистеми «*InOrg*» і «*Org*», що означає «*InOrganic*» і «*Organic*». Це легко записати у вигляді пояснювальної формули ($ES = IO + O$). До найбільш поширених типів граничних частин *ES*-екосистем відносяться:

- мозок людини та штучний інтелект (ШІ);
- людина-технологічний процес;
- фотосинтез і неорганічні джерела енергії;
- урбосистема та навколишнє природне середовище;
- співвідношення ентропії в живому і неорганічному середовищі;

Деякі узагальнені характеристики властивостей таких систем надані в таблиці

1.

Таблиця 1 – Деякі узагальнені якості вуглецево-білкового і штучного неорганічного частин у співвідношенні до ES-екосистеми.

Якісна характеристика частин екосистеми	Вуглецево-білковий світ, людина	Штучний неорганічний світ (техн. система)
Структура	Самоорганізована, ієрархічна	Кристалічна, аморфна, статична
Енергія	Хімічна (АТФ, глюкоза)	Електрична, механічна, тепла та ін.
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)

Підсистеми «Org» і «InOrg», що нас цікавлять, виявляють властивості як антагоністичного, так і неантагоністичного характеру. До перших відносяться:

- ентропійні властивості, коли біологічні системи чинять опір зростанню ентропії, а неорганічні системи її підвищують;
- адаптивні властивості, гнучкі для органічних і жорсткі для штучних неорганічних;
- відносно високі швидкості для фізичних процесів в штучному неорганічному світі і низькі швидкості, наприклад, для біопроцесів в органічному світі.

До неантагоністичних властивостей можна віднести функціональність і схожість виконуваних завдань, що, власне, і є предметом нашого дослідження, здатність до порівнянних перетворень енергії, стійкість в підтримці системи.

Область взаємного проникнення в прикордонну зону і пов'язаний з нею коефіцієнт μ показують ту частину простору ES-екосистеми, до якої відносяться ті чи інші специфічні якості означених частин цієї системи і загальні для них властивості самої системи. Значення μ для кожного з них буде істотно відрізнятися і показувати ступінь впливу однієї частини на іншу і взаємно. Наприклад, «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. Тим не менш, зворотна реалізація властивості ШІ в людському мозку, судячи з усього, є питанням часу, враховуючи розробку вбудованих чіпів, потреби мозку в такій же швидкості дій, як і у комп'ютерних системах [4].

У даній роботі ми розглянемо, як змінюється ентропія досліджуваних систем на межі їх взаємодії в залежності від ступеня умовного взаємного проникнення μ . 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-екосистему, 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.

Результати дослідження деяких термодинамічних параметрів, що зв'язують області *ES*-екосистеми 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, вихідні температурні параметри від яких дуже залежить 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 розраховані дані, покажемо, що щорічна зміна ентропії $\Delta S_{NonOrg} \approx +1,25 \cdot 10^{14} \text{ Дж}/\text{К}$ або $\approx +3,42 \cdot 10^{11} \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{добу}} \approx +0,0198 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{с})$ і показує на деградацію граничної області *ES*-екосистеми. В цілому ми бачимо стрибок ентропії на кордоні *ES*-екосистеми (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.

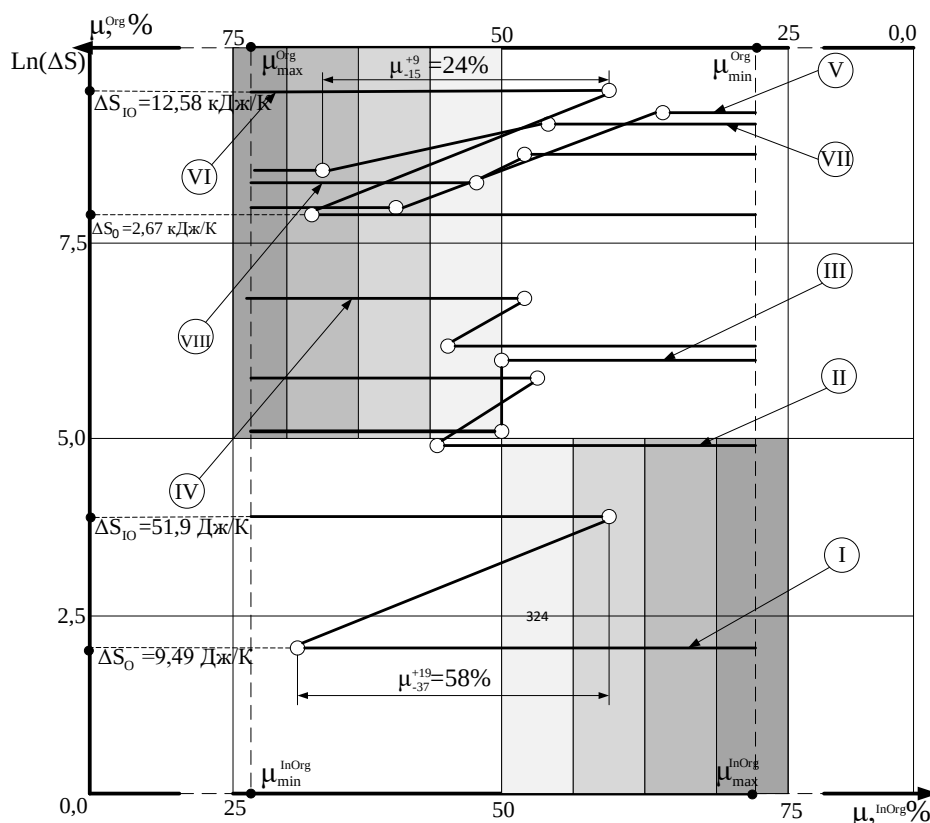


Рисунок 1 – Межі зміни ентропії в деяких частинах ES-екосистемах в залежності від параметра μ . (Тут ентропія, що записана через натуральний логарифм, вимірюється в Дж/К.)

Ще одна специфічна структурна частина ES-екосистеми, яка описує граничну область, це та, в якій співіснують системні якості людського мозку і штучного інтелекту. Вона несе в собі якості мінливої термодинамічної ентропії (ΔS), та визначається через енергію, яка споживається як мозком, так і технічними системами, що забезпечують функціонування штучного інтелекту, відповідно, та описує дві підсистеми «Org» і «InOrg» виходячи з їх функціонального призначення [5].

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 $H_{InOrg} = +32 \cdot 10^9 \text{ біт}$ 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 складових ES-екосистеми очевидний, а сама перехідна функція може бути не тільки гладкою, але навіть бінарною, що відображає невизначеність в ES-екосистемі при такому перехідному процесі. Слід зазначити, що процедури вивчення ентропії для ES-екосистем дуже складні, і в кожному варіанті досліджуваних їх частин вимагає свого персонального підходу. Тим не менш, такі розрахунки можна привести до засвоюваного результату, який дозволить ефективно проаналізувати ці дані.

На рис. 1 показані інші області для μ , де мають вигоди специфічні властивості деяких структурних складових ES-екосистеми, що описані в табл. 2 і складаються з двох підсистем: «InOrg» і «Org». Перетин ентропії при переходах в області ES-екосистеми може відбуватися як поступово – від «InOrg» до «Org», так і навпаки, від «Org» до «InOrg» і по низхідній, в тому ж порядку

Таблиця 2 – Перехідні процеси в змінах ентропії на межі органічних і неорганічних складових у ES-екосистемі.

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

Це по різному може характеризувати кожну з таких частин *ES*-екосистеми. Наприклад, частини *ES*-екосистеми «мозок-штучний інтелект» характеризується низхідним вектором стрибка зміни ентропії в бік підсистеми «*Org*», в якій підсистема «*InOrg*» схильна до великих змін ентропії ($\Delta S_{InOrg} = +51,9 \text{ Дж}/(\text{кгK})$), як менш організована, ніж мозок ($\Delta S_{Org} = +9,49 \text{ Дж}/(\text{кгK})$).

Цим пояснюються, зокрема, сучасні переваги мозку в когнитивності перед системами штучного інтелекту, а також завдяки високій адаптації, самовідтворенню та гомеостазу [4]. Тобто в *ES*-системі очевидні переваги органічного над неорганічним.

Розглянуті таким же чином частини *ES*-екосистеми, 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).

Для деяких *ES*-систем можуть спостерігатися взаємно протилежні тенденції. Наприклад, для складової *ES*-екосистеми - «нанотехнології», переважне зростання ентропії стосується до неорганічної складовій «*InOrg*» ($\Delta S = +4447 \text{ Дж}/(\text{кгK})$), а її органічна складова показує на спрямованість до відносно більшої організованості, що має вираз у мінімізації зростання її ентропії ($\Delta S = +3294 \text{ Дж}/(\text{кгK})$). Слід відмітити, що, як правило, погранична ентропія з боку штучного неорганічного середовища суттєво перебільшує такий показник для органічного середовища (табл. 1). І це також є причиною сильної нерівноважності для всієї *ES*-екосистеми, як джерелом її якості, так і умовою для її розвитку.

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 структурна складова *ES*-екосистеми прагне до впорядкованості і підлягає відповідним дослідженням. В інших випадках, для *ES*-екосистеми в цілому характерне зростання інтегральної ентропії або прагнення до термодинамічної рівноважності.

Ми маємо справу з деякою новою якістю *ES*-екосистем, яка не описана в доступній літературі. Ентропійні перехідні процеси в певному розрізі живого та неживого можуть вказувати на певні зміни в стійкості *ES*-екосистеми, 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*-екосистеми 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.

До наступних синергетичних властивостей, що пов'язані з окремими складовими в структурі *ES*-екосистеми для відомих органічних і штучних неорганічних кластерів, що взаємодіють, можна віднести наступні:

- підвищена механічна міцність на межі органічних і штучних неорганічних матеріалів, наприклад, кісткових з'єднань у вигляді композиту органічного колагену (гнучкість) і неорганічного гідроксиапатиту (твердість) [6], що тримають перехідний процес між ентропійними станами в такій *ES*-системі в розмірі не менш $-0,34 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ в напрямку зниження ентропії [7];

- нові властивості органічних напівпровідників (*OSs*), що утворюють чисті інтерфейси з металами та діелектриками, органічних світлодіодів (*OLed*) та фотоелектричних елементів (*OPV*) з інжекцією та розділенням заряду [6];

- каталітична активність на межі розділу «*InOrg*» і «*Org*», наприклад, платина і ліганди надає більш високої селективності і стабільності каталізаторів, коли при гетерогенному каталізі органічні молекули модифікують поверхню неорганічного каталізатора, даючи підвищену реакційну здатність. Експериментально підтверджена амплітуда перехідного процесу, пов'язана зі станом ентропії на кордоні *EC* - система «ліганд-платина» досить висока в діапазоні $+(1682.1 \div 3045.6) \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$. У відповідності до інших експериментальних даних [8], такий стрибок ентропії на межі двох вказаних підсистем складає $-3471 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$;

- властивості *ES*-систем, пов'язаних з акумулюванням та перетворенням енергії, наприклад, перовскітні сонячні елементи ABX_3 (*A*-органічний катіон; *B* -метал; X_3 -аніонний галоген) підвищують ефективність поглинання світла і перенесення заряду, тим самим сприяючи виникненню нової цікавої синергетичної якості. За аналітичними даними [3, 5] перехідний процес на межі «*Org*» і «*InOrg*» складає $-420,3 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$, що не перевищує 40% від первинного значення ентропії.

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*-системи в зв'язку зі складністю відповідних досліджень. Як правило, цьому повинні передувати реальні експерименти. Тим не менш, системні властивості *ES*-екосистеми що знаходяться на межі двох

підсистем «*InOrg*» і «*Org*», у багатьох випадках підтверджуються і мають право на існування.

Література

1. Prigogine I., Stengers I. Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature. London: Heinemann, 349 p.
2. Dincer I. Rosen M. A. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. 576 p.
3. Margulis L Symbiosis in Cell Evolution. 2nd ed. New York: W.H. Freeman, 1993. 452 p.
4. Волошин В. С., Азархов О. Ю. Людина чи машина: інтелект та міцність, перспективи та конкуренція. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Т.14. №1, 2024.
5. Волошин В. С., Азархов О. Ю. Конкуренція та перспективи білково-вуглецевих та специфічних неорганічних екосистем на Землі. Вісник Приазовського державного технічного університету. 2024. Вип. 48. Сер. Технічні науки. С. 111-120.
6. Chun-Yen Lin, Chao-Hsien Hsu, Chieh-Ming Hung, ect. Entropy-driven charge-transfer complexation yields thermally activated delayed fluorescence and highly efficient OLEDs. Nature Chemistry V. 16, 2024. P. 98–106.
7. Katsanos A., Kapolos J. Time distribution of adsorption entropy of gases on heterogeneous surfaces by reversed-flow gas chromatography. Journal of Chromatography A. Vol. 1127, Issues 1-2. 2006. P. 221-227
8. Estejab A., García Cárcamo R., Getman R. B. Influence of an electrified interface on the entropy and energy of solvation of methanol oxidation intermediates on platinum (111) under explicit solvation. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 2022. P. 274-285.