

УДК 574.4:621.1.0167

**ТЕРМОДИНАМІЧНІ АСПЕКТИ  
СТІЙКОСТІ ЕКОСИСТЕМ**

Частина II

***I. I. Роман**, кандидат біологічних наук, доцент  
Миколаївський державний аграрний університет*

*Розглянуто питання самоорганізації систем залежно від ентропійних параметрів їх складових компонентів.*

*Показано, що для закритих систем з позитивною ентропією компонентів з підвищенням їх організації стійкість до зовнішніх збурень зменшується, для відкритих систем з позитивною ентропією компонентів стійкість до зовнішніх збурень збільшується при зменшенні організації системи.*

У попередній статті [1] було визначено, що загальний баланс ентропії в системі у стані стаціонарної рівноваги описується рівнянням:

$$\frac{d}{dt} \int_V S_i dv + \int_A S_i da = \int_V S dv . \quad (1)$$

Для рішення рівняння (1) необхідно визначити поведінку функції стабільності організації  $CO_p = F(\Delta S)$  для систем різного типу. У даній статті наведено деякі теоретичні підходи для вирішення цього питання.

Для закритих систем з позитивною ентропією компонентів  $\sum_i S_i > 0$ , згідно з II законом термодинаміки для невірноважених систем  $CO_p(\Delta S) \leq CO_p(-\Delta S)$ , тобто реалізується  $CO_p(\Delta S) < CO_p(-\Delta S)$ , коли система нестійка і її організація необоротно деградує, тобто  $\frac{dO_{\text{сист.}}}{dt} < 0$  і  $Q < 0$ , де  $Q = \frac{dO_{\text{сист.}}}{dt}$ ;

$Q$  – самоорганізація системи, тобто організація таких систем деградує. Це твердження справедливо лише при виконанні умови:

$$\left| \int_{t_1}^{t_2} (\Delta S^{(+)} ) dt \right| = \left| \int_{t_1}^{t_2} (\Delta S^{(-)} ) dt \right|. \quad (2)$$

Якщо в систему надходить негентропія в об'ємі більшому (наприклад запрограмованого людиною втручанням в систему) у порівнянні з надходженням із середовища ентропії, організація такої системи може зберігатись на визначеному рівні, або й збільшуватись. Якщо надходження негентропії буде відсутнє, система не спроможна до самоорганізації.

Для відкритих систем з позитивною ентропією компонентів в стаціонарному стані приріст ентропії всередині системи в одиницю часу сталий і мінімальний за рахунок надходження негентропії ззовні [2]

$$S_{\text{сист.}} = \text{const.} \quad (3)$$

Можливе надходження негентропії в систему має пряму залежність від її організації, оскільки при  $S_1 > 0$  компоненти системи самі собою не спроможні вбирати негентропію з середовища і це, таким чином, є властивістю зв'язків системи. Чим більша негентропійність зв'язків (організація системи), тим більший можливий притік негентропії ззовні.

Якщо організація системи недостатня для забезпечення мінімального надходження негентропії, тобто (3) не виконується, стаціонарний стан в такій системі не може бути досягнутий, система не стійка і приречена до загибелі. Якщо організація системи достатня для виконання умови (3), система приходить до стаціонарного стану, в якому швидкість зростання ентропії в системі і надходження негентропії ззовні будуть у часі сталі й мінімальні.

При цьому такий стаціонарний стан (2) має стійкість в тому розумінні, що система буде виведена з нього внаслідок якогось

зовнішнього збурення, яке не перевищує деякого порогу (межі стійкості). Система буде прагнути повернутися до стаціонарного стану, мінімалізуючи при цьому як швидкість продукції ентропії, так і надходження ззовні негентропії, тобто вимога до величини організації системи буде зменшуватися.

З цього твердження бачимо, що у відкритих системах з позитивною ентропією компонентів відсутні власні фактори, які б забезпечували збільшення організації, тобто самоорганізації. Зменшення організації системи безумовно призведе до зменшення надходження негентропії, виходу її зі стаціонарного стану і наступної руйнації системи.

З цього слідує, що в стаціонарному стані

$$O_{p \text{ сист.}} = \text{const} , \quad (4)$$

тобто  $CO_p(\Delta S) = CO_p(-\Delta S)$  і  $Q_{\text{сист.}}=0$  і, таким чином, система з позитивною ентропією компонентів не здатна до самоорганізації.

Для системи з негативною ентропією компонентів системи  $\sum_i Si < 0$ . Якщо з зовнішнього середовища надходять частки позитивної ентропії  $\Delta S > 0$ , і якщо  $\Delta S'$  – частка  $\Delta S$  поглинена компонентами системи:

$$\Delta S' = \Delta S , \quad (5)$$

згідно з твердженням Н.І. Кобозева [3]. Якщо  $\Delta S < 0$ , тоді (5) не виконується, тому що зв'язки системи вбирають негентропію з середовища. Звідси:

$|\Delta S'| < |\Delta S|$  і  $|\Delta S - \Delta S'| > 0$ , а значить і  $CO_p(\Delta S) > CO_p(-\Delta S)$ , тобто

$$Q_{\text{сист.}} > 0. \quad (6)$$

Нерівність (6) справедлива для будь-яких антиентропійних систем (живих організмів, екосистем і т.п.) при виконанні умов (2). Реальна екосистема сукцесірує в напрямку до настан-

ня клімаксу [4]. Сталість зовнішніх умов (часто періодичне) за ідеального клімаксу відповідає відсутності надходження інформації в систему ззовні, тому

$$\Delta I = -\Delta S = 0. \quad (7)$$

З цього слідує  $\Delta S > 0$  завжди і для екосистем, як антиентропійних:

$$\Delta S' = \Delta S \text{ і } CO_p = \frac{\Delta S''}{\Delta S} = I,$$

з чого слідує, що

$$\text{Осист} = \text{const}, \frac{dO_{\text{сист}}}{dt} = 1 \text{ і } Q_{\text{сист}} = 0. \quad (8)$$

Ідентичність виразу (4) для стаціонарного стану і (6) для ідеального клімаксу відрізняється тим, що, якщо порушуються умови (7), екосистема прагне до самоорганізації, тобто  $\frac{dO_{\text{сист}}}{dt} > 0$ . У випадку (4) відкриті системи до самоорганізації

нездатні і, якщо вони виведені зі стаціонарного стану, тоді їх розвиток спрямований у напрямку зменшення організації, що вимагається, тобто вираз (8) за умови (7) має місце тільки для антиентропійних систем.

Розглянемо, як змінюється стійкість (Z) закритих і відкритих систем з позитивною ентропією компонентів до зовнішніх збурень. Стійкість системи – це межа, за якою можуть змінюватися параметри системи, що визначають її існування як такої.

Для неврівноважених систем, згідно з II законом термодинаміки,  $Z < 0$ , Z зв'язана з S системи співвідношенням:  $Z_{\text{сист}} = S - S_{\text{max}}$ , де S – фактична ентропія системи,  $S_{\text{max}}$  – максимальна ентропія системи за термодинамічної рівноваги.

$$Z_{\text{сист}} = \sum_i S_i - O_{\text{сист}} - S_{\text{max}} \quad (9), \quad O_{\text{сист}} = -\sum_j \Delta S_j, \quad (9)$$

де  $j = 1, 2, 3, \dots, N$  – внутрішні зв'язки системи. Якщо  $\sum_i S_i = const$

і  $\frac{dS_{max}}{dt} = 0$ , диференціюємо (9), отримаємо:

$$\frac{dZ_{cucm}}{dt} = -\frac{dO_{pcucm}}{dt}. \quad (10)$$

З (10) слідує, що збільшення організації закритих систем з позитивною ентропією компонентів їх стійкості до зовнішніх збурень зменшується.

Для відкритих систем з позитивною ентропією компонентів стійкість до зовнішнього збурення  $\Delta S > 0$  за умови, що  $\Delta S < \Delta S_{кр}$ , система повертається в стаціонарний стан. Для  $\Delta S = 0$

$\left(\frac{ds}{dt}\right)_0$ , за принципом І Пригожина, мінімальна. Для  $\Delta S = \Delta S_{кр}$

$\left(\frac{ds}{dt}\right)_{кр}$  – максимальна. Звідси визначимо стійкість системи:

$$Z_{cucm} = \left(\frac{ds}{dt}\right)_{кр} - \frac{ds}{dt}, \text{ де } \left(\frac{ds}{dt}\right)_{кр} - \text{швидкість нарощування ентропії в системі за критичного зовнішнього збурення. } \Delta S = \Delta S_{кр}, \text{ а } \frac{ds}{dt} - \text{фактична швидкість нарощування ентропії в системі. Звідси в стаціонарному стані, коли } \frac{ds}{dt} = \left(\frac{ds}{dt}\right)_0 = \min, Z_{cucm} = \max. \text{ В межі змін параметрів існування системи: } \left(\frac{ds}{dt}\right)_0 \leq \frac{ds}{dt} \leq \left(\frac{ds}{dt}\right)_{кр}. \text{ Продиференціюємо рівняння (10) за часом з урахуванням, що } \left(\frac{ds}{dt}\right)_{кр} = const, \text{ отримаємо:}$$

вання ентропії в системі за критичного зовнішнього збурення.  $\Delta S = \Delta S_{кр}$ , а  $\frac{ds}{dt}$  – фактична швидкість нарощування ентропії в системі. Звідси в стаціонарному стані, коли

$\frac{ds}{dt} = \left(\frac{ds}{dt}\right)_0 = \min, Z_{cucm} = \max$ . В межі змін параметрів існування системи:

$\left(\frac{ds}{dt}\right)_0 \leq \frac{ds}{dt} \leq \left(\frac{ds}{dt}\right)_{кр}$ . Продиференціюємо рівняння (10) за часом з урахуванням, що

$\left(\frac{ds}{dt}\right)_{кр} = const$ , отримаємо:

маємо:

$$\frac{dZ_{cum}}{dt} = -\frac{d^2S}{dt^2}. \quad (11)$$

З (11) слідує, що стійкість відкритих систем з позитивною ентропією компонентів збільшується зі зменшенням швидкості прирощування в них ентропії, тобто зі зменшенням надходження негентропії ззовні, і, таким чином, зі зменшенням організації системи, що вимагається. Таким чином, для збільшення стійкості даних систем не потрібно збільшення їх організації, але в той самий час зміна організації в той чи інший бік безпосередньо не впливає на їх стійкість.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Роман І.І., Волчо Д.Д. Термодинамічні аспекти стійкості екосистем // Вісник аграрної науки Причорномор'я.-2006.-4(37)-Т.2-С.-225-231
2. Пригожин. И. Введение в термодинамику необратимых процессов. - М.,1960.
3. Н.И. Кобзев. О физико-химическом моделировании процессов информации и мышления // Журнал физической химии.-1966.-Т.40. Вип.4.-С.36-42.
4. Marqalef R. Perspectives in Ecological // Theory The Univ of Chicago press.-1989.-р.262-263.