

УДК 536 (075.6):53

А.А. Долинский<sup>1</sup>, Б.Х. Драганов<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт технической теплофизики НАН Украины<sup>2</sup> Национальный аграрный университет Украины

## ЭНТРОПИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ ЖИВЫХ СУЩЕСТВ

Викладено термодинамічні основи біологічної еволюції. Підкреслюється принцип ієрархічного розвитку життя і взаємозалежність ентропії й інформації в процесі еволюції.

Излагаются термодинамические основы биологической эволюции. Подчеркивается принцип иерархического развития жизни и взаимозависимость энтропии и информации в процессе эволюции.

Thermodynamic bases of biological evolution are considered. The principle of hierarchical life development and interdependency of entropy and information in the evolution process is emphasized.

$D$  – индукция электрического поля;  
 $E$  – функция напряженности поля;  
 $F$  – термодинамический потенциал;  
 $F(x, t)$  – функция распределения;  
 $p$  – давление;  
 $S$  – энтропия;  
 $t$  – время;  
 $T$  – температура;  
 $v$  – объем;

$W$  – параметр состояния системы;  
 $x$  – координата;  
 $X_i$  – макроскопические переменные;  
 $Z_k$  – ценность генетической информации;  
 $\lambda$  – управляющий параметр.

**Индексы:**

*ген* – мера генетической информации;  
*сам* – мера информации самоорганизации.

Живые существа функционально и морфологически являются наиболее сложными и высокоорганизованными из всех природных объектов. Необходимо отметить, что живые системы, в том числе на клеточном уровне, с точки зрения термодинамики ведут себя как неравновесные объекты с сильными неоднородностями.

На эволюцию этих систем влияет изменение некоторых характерных параметров, обусловленных влиянием внешних факторов, которые могут быть названы управляющими. Для равновесного состояния, в наиболее простом случае, эволюция параметров системы описывается соотношением [1]

$$F_i(\{X_s\}, \lambda) = 0, \quad (1)$$

где  $F_i$  – сколь угодно сложная функция, зависящая от макроскопических переменных системы и параметров  $\lambda$ .

Это соотношение справедливо при определенных ограничениях. Например, законы эволюции должны быть таковы, чтобы выполнялись требования положительности температуры и химической концентрации, характерные для этой системы.

Как известно, для неравновесных систем характерна тенденция к необратимости, которая характеризуется энтропией  $S$ , определяемой как логарифм числа  $W$  возможных состояний системы при заданных условиях:

$$S = K \ln W. \quad (2)$$

Возможное состояние системы определяется физическим параметром  $K$ . Величина  $W$  может быть сложной функцией признаков и условий.

Если возможное состояние системы характеризует функция распределения  $f(x, t)$ , то зависимость (2) примет вид

$$S(t) = -K \int f(x, t) \ln f(x, t) dx. \quad (3)$$

При этом, в зависимости от конкретного вида  $K$  и характера осреднения при записи  $f(x, t)$  выражение (3) может описывать энтропию в форме Больцмана, Шеннона, или Гиббса. В частности, на этой основе в [2] вводится соответствующая функция распределения для энтропии.

Определение больцмановской информации (энтропии) всегда связано с вариационной задачей

определения максимума вероятностей, решение которой приводит к отысканию множителей Лагранжа. Это значит, что для больцмановской информации существует тождественное механическое описание на основе энергии со свойствами потенциала сил, характеризуемых множителями Лагранжа, и количеств в виде самой энтропии.

Напомним, что множители Лагранжа — это переменные, с помощью которых строится функция Лагранжа при исследовании задач на экстремум.

В вариационном исчислении с помощью множителей Лагранжа удобно получать необходимые условия оптимальности в задаче на условный экстремум как необходимое условие безусловного экстремума некоторого составного функционала.

Классические открытые термодинамические системы характеризуют главным образом взаимодействие энергии и информации. В живых системах нет обмена между энергией и информацией или потоков непосредственно информации, которые бы сами по себе играли существенную роль в процессах жизни.

Для неизолированных систем, обменивающихся с внешней средой энергией и веществом, изменение энтропии представляет собой сумму двух членов. Один из них  $d_e S$  обусловлен происходящими обменов. Другой  $d_i S$  обусловлен процессами внутри системы [3]:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_i S}{dt} + \frac{d_e S}{dt} . \quad (4)$$

Для изолированной системы  $d_e S = 0$  и уравнение (4) сводится к зависимости  $dS = d_i S = \geq 0$ .

Для необратимых процессов (химические реакции, теплопередача, диффузия, вязкая диссипация и т.д.) можно определить соответствующий внутренний поток  $I_k$ , отражающий скорость течения процесса, а также движущую силу  $X_k$ , отражающую соответствующее неравновесное ограничение. Между  $I_k$  и  $X_k$  может быть установлена линейная зависимость:

$$I_k = \sum_l L_{kl} X_l , \quad (5)$$

где  $L_{kl}$  — феноменологические коэффициенты.

В соответствии с принципом Онзагера для уравнения (3) выполняется дополнительное соотношение  $L_{kl} = L_{lk}$  [4].

В зависимости от характеристики системы величина  $d_e S$  может быть как положительной, так и отрицательной. Если  $d_e S$  отрицательно и пре-

вышает по абсолютной величине  $d_i S$ , то определенные стадии эволюции могут происходить при общем понижении энтропии:

$$\frac{dS}{dt} < 0 . \quad (6)$$

Это означает, что в ходе эволюции упорядоченность уменьшается за счет оттока энтропии.

Отличительная особенность энергетики жизни от технических тепловых процессов заключается в том, что она использует электрохимические термодинамические циклы. При этом живые системы используют не внутреннюю энергию (как тепловая машина), а свободную энергию  $F$  — термодинамический потенциал, дифференциал которого (с учетом химической и электрической энергии)

$$dF = -SdT + vdp + EdD - \sum_i n_i d\mu_i , \quad (7)$$

где  $n_i$  — концентрация;  $\mu_i$  — химический потенциал.

Принципиальная особенность свободной энергии состоит в том, что энтропия  $S$  не входит в число независимых переменных задач. Это означает, что взаимодействие энергии и количества информации, поступающих извне, не есть определяющим для процесса жизни и ее эволюции. Для генетических механизмов главное — свойство вещества, и, следовательно, при описании процесса независимой переменной должен быть химический потенциал. В живых системах имеет место превышение производства энергии над ее диссипацией, а избыток энергии аккумулируется.

Жизнь без механизма производства энергии для метаболизма существовать не может. Главная особенность жизни как открытой термодинамической системы в том, что внешняя среда взаимодействует с ее формами и процессами на основе синтеза информации путем изменения нормировки энтропии. Поскольку синтез информации есть изменение признаков и условий в определении энтропии, отличительной особенностью синтеза генетической информации является иерархичность [5, 6]. Это означает, что каждый раз изменение признаков и условий создает локальный путь отсчета энтропии. Морфологическая иерархичность — это все более укрупняющийся симбиоз.

Иерархический ряд для энтропии как меры информации был записан в виде

$$S_k = S_0 + S_1 + S_2 + \dots [0, 1, 2, \dots (k-1)] , \quad (8)$$

где энтропия  $k$ -го вида живого

$$S_k = S_{k,ген} + S_{k,сам}, \quad (9)$$

где  $S_{k,ген}$  — сумма меры генетической информации;  $S_{k,сам}$  — мера информации о процессах самоорганизации, для которых свойства элементов системы создают величины  $S_{k,ген}$ .

Число, показывающее во сколько раз уменьшается количество информации при переходе к следующей иерархии синтеза информации, называется ценностью генетической информации

$$Z_k = S_{k,ген} / S_{(k+1),ген}. \quad (10)$$

Ценность генетической информации падает по мере эволюции жизни [5].

Генетическая информация как запоминание случайного выбора всегда возникает в результате взаимодействия с окружением, когда реализация запоминания в виде многократного воспроизведения происходит на основе процессов, принципиально отличных от тех, которые создали исходную генетическую случайность. Такой ступенчатый синтез информации носит иерархический характер и описывается энтропией. Ее определяют условия вероятности, поэтому по мере усложнения форм жизни уменьшается энтропия в пределах данной ступени иерархии.

Надо полагать, Дж. Николис и А.М. Хазен правы [5, 6], когда утверждают, что жизнь обусловлена иерархическим синтезом случайностей, причем для каждой последующей иерархии синтезируются свои условия, отличные от условий на предыдущих ступенях. В результате к энтропии, описывающей предыдущее состояние системы, добавляется энтропия, создаваемая новыми состояниями, которые регулируют новые условия.

Поэтому эволюция жизни в сторону более организованных форм есть процесс иерархического увеличения суммарной энтропии. Жизнь — естественный процесс (поэтому самопроизвольный) увеличения энтропии. Иерархия синтеза информации и есть эволюция жизни.

### Выводы

Указывается, что иерархический характер синтеза информации в процессе эволюции и развития живых существ (Дж. Николис, А. Хазен) описывается энтропией. Эволюция жизни в сторону более организованных форм есть процесс ступенчатого увеличения суммарной энтропии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 344 с.
2. Климонтович Ю.Л. Турбулентные движения и структура хаоса. — М.: Наука, 1990.
3. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. — М.: ИЛ.; 1960. — 127 с.
4. Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. — М.: Мир, 1964. — 456 с.
5. Николис Дж. Динамика иерархических систем. Эволюционное представление: Пер. с англ. / Предисловие Б.Б. Кадомцява. — М.: Мир, 1989. — 488 с.
6. Хазен А.М. Происхождение и эволюция жизни и разума с точки зрения синтеза информации // Биофизика. 1992. Том 37, вып. 1, с. 105-121.

Получено 19.10.2005 г.