Адрес этой статьи в интернете: www.biophys.ru/archive/congress2012/proc-p102-d.pdf

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ (ТЕРМОДИНАМИКА ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ)

Горовой Ю.М.
Ярославский государственный технический университет,
150040, Россия, Ярославль, Московский проспект 88, **E-mail:gorovoyj@pochta.ru**

Постановка задачи

Факты, которые невозможно описать и истолковать в рамках сложившихся теоретических представлений служат основой развития новых физических теорий. Классическая равновесная термодинамика не применима для систем, не подчиняющихся аксиоме об аддитивности энергии. Это отнюдь не экзотические системы! К таким неаддитивным системам относятся, например, доменные структуры ферромагнетиков и сегнетоэлектриков, биологические макромолекулы: белки и ДНК, окруженные водяной шубой. Впрочем, все участники Симпозиума, так или иначе, сталкиваются именно с такими системами. Неаддитивные системы обладают общими признаками:

- они неоднородны (структурированы);
- находятся в метастабильном состоянии (и могут находиться в таком состоянии практически неограниченное время);
- мультистационарны: могут находиться при одинаковых внешних условиях не в одном, а в нескольких различных метастабильных состояниях,
- они способны содержать информацию.

Для ДНК и молекул белков это ясно, впрочем, как и для доменных структур, если вспомнить о магнитных носителях информации.

Неаддитивность (целостность), структурированность и наличие информации – это основные признаки сложных систем, согласно ключевым постулатам системного анализа.

Создание основ статистической термодинамики, которая описывает состояние сложных систем и их взаимодействие с внешним окружением - цель этой работы.

Динамический подход, лежащий в основе статистической термодинамики позволяет обоснованно отказаться от кажущихся незыблемыми аксиом классической термодинамики и на методологически выверенной основе построить термодинамику сложных систем. ***«Вопрос о границах применимости классической термодинамики может быть не только поставлен, но и решен путем построения статистической теории допустимых с точки зрения динамической теории микромоделей и исследования возможных отклонений от законов классической термодинамики, получающихся в данной статистической теории. Таким путем может быть поставлена и решена проблема построения некоторой <u>неравновесной неаддитивной термодинамической теории</u>, в которой классическая термодинамика должна получаться лишь как некоторый предельный частный случай при осуществлении определенных ограничений. (Я.П. Терлецкий. Статистическая физика [2] .)***

Классическая термодинамика имеет в качестве динамического основания микромодель [2], удовлетворяющую основным аксиомам термодинамики:

- аксиоме аддитивности (поскольку потенциальная энергия взаимодействия резко убывает по мере увеличения расстояния, следовательно, энергией взаимодействия подсистем, составляющих систему можно пренебречь);
- аксиоме равновесия, поскольку потенциальная энергия системы имеет единственный минимум, соответствующий равновесному состоянию системы.

Для сложных систем характерны совершенно иные свойства:

- не применима аксиома аддитивности (энергией взаимодействия подсистем пренебречь нельзя);

- не применима аксиома равновесия (система может находиться в метастабильном состоянии, причем таких состояний может быть несколько), что означает наличие нескольких минимумов энергии взаимодействия подсистем.

Эти два допущения: относительно значимой величины энергии взаимодействия подсистем сложной системы и наличия множества минимумов этой энергии вполне достаточны для построения статистической термодинамики сложных систем. Такое построение произведено в строгом соответствии методу Гиббса [3], причем в классическом варианте этого метода. Естественно, сложная система в целом будет удовлетворять всем аксиомам и требованиям классической термодинамики при условии сохранения неизменными параметров взаимодействия подсистем. Особые свойства сложной системы проявятся при взаимодействии ее подсистем.

Подчеркнем, что метастабильные состояния сложной системы будут неравновесными в строгом понимании термодинамического равновесия, как абсолютно устойчивого состояния. Однако метастабильные состояния сложной системы стационарны, что дает возможность применить для описания этих состояний аппарат классической статистической термодинамики.

1. Теорема Лиувилля для сложной системы.

Особенности статистической термодинамики сложных систем наглядно проявляются при сопоставлении с классической статистической термодинамикой, созданной Дж. В. Гиббсом.

Рассмотрим сложную систему, состоящую из двух подсистем. В сложной системе энергией взаимодействия пренебречь нельзя. Энергию сложной системы, можно представить как сумму энергий невзаимодействующих подсистем и энергии взаимодействия этих подсистем.

$$\varepsilon c = \varepsilon 1 + \varepsilon 2 + \varepsilon вз \qquad (1.1)$$

Энергия взаимодействия может иметь однозначную или неоднозначную зависимость от состояния каждой из взаимодействующих подсистем, то есть от энергий подсистем. Обобщенные координаты и обобщенные импульсы подсистем сложной системы зависят от энергии взаимодействия и, следовательно, подсистемы статистически зависимы.

$$\begin{aligned} q1 &= \frac{\partial}{\partial}\frac{\varepsilon 1}{p1} + \frac{\partial}{\partial}\frac{\varepsilon вз\,(1,2)}{p1} \\ p1 &= \frac{\partial}{\partial}\frac{\varepsilon 1}{q1} + \frac{\partial}{\partial}\frac{\varepsilon вз\,(1,2)}{q1} \end{aligned} \qquad (1.2)$$

Статистическая зависимость подсистем может быть выражена в вероятностной форме

$$Pc = P1 \cdot P2\ i(1,2) \qquad (1.3)$$

где: P1 и P2 - безусловные вероятности состояния взаимодействующих подсистем, а **i(1,2) – информация об индивидуальном событии (так условимся называть эту величину, которая, как будет показано ниже, тесно связана с количеством информации в индивидуальном событии).**

Между плотностью числа состояний сложной системы в фазовом пространстве и вероятностью нахождения сложной системы в определенном состоянии существует очевидная связь. Одна из формулировок теоремы Лиувилля относится именно к вероятности. Легко показать, что плотность

числа состояний сложной системы имеет вид:

$$Dc = D1 \cdot D2\ i(1,2) \qquad (1.4)$$

Теорема Лиувилля для сложной системы приобретает следующую форму:

$$i(1,2)D2\sum\left(\frac{\partial}{\partial}\frac{D1}{p1}\dot{p}1+\frac{\partial}{\partial}\frac{D1}{q1}\dot{q}1\right)+$$
$$+\,i(1,2)D1\sum\left(\frac{\partial}{\partial}\frac{D2}{p2}\dot{p}2+\frac{\partial}{\partial}\frac{D2}{q2}\dot{q}2\right)+$$
$$+\,D1\,D2\left[\sum\left(\frac{\partial}{\partial}\frac{i(1,2)}{p1}\dot{p}1+\frac{\partial}{\partial}\frac{i(1,2)}{q1}\dot{q}1\right)+\right. \qquad (1.5)$$
$$\left.+\sum\left(\frac{\partial}{\partial}\frac{i(1,2)}{p2}\dot{p}2+\frac{\partial}{\partial}\frac{i(1,2)}{q2}\dot{q}2\right)\right]=0$$

Отличие поведения сложной системы в фазовом пространстве принципиально: **фактически вместо двух подсистем в результате взаимодействия появляется еще и третья подсистема с качественно иными свойствами.** Роль плотности числа состояний в третьей подсистеме играет величина i(1,2), связанная с информацией. Другое важное отличие от обычной подсистемы: фазовое пространство третьей подсистемы не имеет собственных обобщенных координат и обобщенных импульсов (собственных степеней свободы). Эта подсистема не связана с собственными отдельными материальными носителями и является коллективным свойством сложной системы (как квазичастица). Логичное название третьей подсистемы – квазиподсистема.

Как и в классическом случае, для сложных систем теорема Лиувилля справедлива в трех формулировках:

$$Dc = D1 \cdot D2 \cdot i(1,2) = const(t)$$
$$Pc = P1 \cdot P2 \cdot i(1,2) = const(t) \qquad (1.6)$$
$$Гc = Г1 \cdot Г2 \cdot i(1,2) = const(t)$$

Необходимо отметить, что теорема Лиувилля применима как для равновесного, так и для метастабильного состояния, поскольку в обоих случаях система находится в равновесии (ограниченное или неограниченное время).

Поведение сложной системы имеет существенную особенность: в результате взаимодействия подсистем происходит деформация фазового пространства сложной системы. Эта деформация непосредственно связана с информацией, которой взаимодействующие подсистемы обладают друг о друге в результате существования взаимодействия.

Деформация фазового пространства сложной системы приводит к появлению информации. Информация органично появляется в качестве физического параметра статистической термодинамики сложных систем.

$$ik(1,2) = \ln i(1,2)$$

где: ik(1,2) - количество информации в индивидуальном событии.

Рассмотрим статистический смысл величины ik(1,2) прежде, чем выявим ее физический смысл. В качестве статистического понятия **количество информации в индивидуальном событии** достаточно давно и полно определено [4]:

$$ik(1,2) = \ln\frac{P(1/2)}{P1} \qquad (1.7)$$

Эта величина служит мерой информации, которую мы можем получить об объекте 1, если в результате измерения установим количественную величину объекта 2, при условии, что объекты 1 и 2 статистически зависимы.

Информация об индивидуальном событии в статистическом смысле соответствует информации о конкретном (индивидуальном) состоянии сложной системы, точнее о двух конкретных состояниях взаимодействующих подсистем, составляющих сложную систему. Поскольку подсистемы в результате взаимодействия приобретают статистическую зависимость, состояние одной из них содержит информацию о состоянии другой.

Выяснив статистический смысл величины информации в индивидуальном событии, и установив, что он полностью совпадает со смыслом, этой величины как мерой степени взаимодействия и статистической зависимости подсистем сложной системы, можно четко сформулировать одно из ключевых понятий статистической термодинамики сложных систем.

Понятие квазиподсистемы.

Квазиподсистема это – третья подсистема, которая выявлена в уравнении (1.5). Квазиподсистема – это деформация фазового объема сложной системы в результате взаимодействия подсистем. У квазиподсистемы нет собственных обобщенных координат и обобщенных импульсов. Она – коллективное свойство сложной системы, такое же, как и квазичастица. Отсюда и произошло название – квазиподсистема.

Фазовый объем сложной системы формально распадается на фазовые объемы невзаимодействующих подсистем и фазовый объем квазиподсистемы. При этом информация об индивидуальном событии органично становится параметром, характеризующим сложную систему в качестве меры относительной доли фазового объема квазиподсистемы в фазовом объеме сложной системы.

Помимо информации квазиподсистема отражает наличие в сложной системе пространственной неоднородности (то есть структуры) и динамической неоднородности в пространстве обобщенных импульсов.

Следствия образования квазиподситемы в фазовом пространстве сложной системы в полной мере будут выявлены в следующей главе.

2. Микроканоническое распределение для сложной системы. Вывод основного уравнения термодинамики сложных систем.

Сложная система в целом (когда нет необходимости рассматривать взаимодействие подсистем) подчиняется законам классической термодинамики. Для сложной системы в целом справедливы все соотношения статистической термодинамики в классическом варианте, разработанном Дж. В. Гиббсом [3].

Плотность вероятности системы, состоящей из невзаимодействующих подсистем, (микроканоническое распределение)

$$w_c = (1/\Omega_c)\,\delta[E_c - H_c(X_c, a)] = (1/\Omega_1 \Omega_2)\,\delta[E_1 - H_1(X_1, a)]\,\delta[E_2 - X_2, a)] \qquad (2.1)$$

где: Ω_c, Ω_1, Ω_2 - нормирующие множители

$$\Omega_1 = \int_{X1} \delta[E_1 - H_1(X_1, a)]\,dX_1; \quad \Omega_2 = \int_{X2} \delta[E_2 - H_2(X_2, a)]\,dX_2;$$
$$\Omega_c = \int_{XC} \delta[E_c - H_c(X_c, a)]\,dX_c \qquad (2.2)$$

Плотность вероятности сложной системы в целом в микроканоническом распределении

$$w_c = (1/\Omega_c)\,\delta[(E_1 + E_2 + E_{вз}) - (H_1(X_1,a) + H_2(X_2,a) + H_{вз}(X_1,X_2,a)] \quad (2.8)$$

Выражение для информации об индивидуальном событии, учитывая выражение (2.2)

$$i(1,2) = (\Omega_1 \Omega_2/\Omega_c)\,\{\delta[(E_1 + E_2 + E_{вз}) - (H_1(X_1,a) + H_2(X_2,a) + H_{вз}(X_1,X_2,a)]\}/ \qquad (2.3)$$
$$/\,\{\delta[E_1 - H_1(X_1, a)]\,\delta[E_2 - H_2(X_2, a)]\}$$

Таким образом, **получено выражение для информации об индивидуальном событии через параметры микроканонического распределения сложной системы.**

Зная распределения вероятностей легко получить выражение для фазовых объемов системы, состоящей из невзаимодействующих подсистем

$$Гc = Г1 \cdot Г2 \qquad (2.4)$$

и сложной системы

$$Гc = Г1 \cdot Г2 \cdot i(1,2) \qquad (2.5)$$

Выражения(2.2), (2.9) и (2.5) - ключевые для вывода основного уравнения термодинамики сложных систем. Отметим, что в выражениях для плотности вероятности и фазового объема сложной системы присутствует характеристика квазиподсистемы – информация об индивидуальном событии.

Вывод основного уравнения термодинамики сложных систем.

Основное уравнение термодинамики сложных систем будет получено в строгом соответствии с классическим методом Гиббса, следуя работе Я.П. Терлецкого [2]. Логика вывода такова: учитывая связь между энтропией и фазовым объемом системы, получают уравнение полного дифференциала осредненного логарифма фазового объема системы. Это уравнение будет соответствовать основному уравнению термодинамики после перехода от статистического к термодинамическому толкованию величин.

Средний логарифм фазового объема и энтропия сложной системы не аддитивны.

$$\overline{\ln \Gamma c} = \overline{\ln \Gamma 1} + \overline{\ln \Gamma 2} + I(1,2) \qquad (2.6)$$

$$Sc = S1 + S2 + I(1,2) \qquad (2.7)$$

Помимо энтропий невзаимодействующих подсистем свой вклад в энтропию сложной системы вносит теперь уже несколько иная характеристика квазиподсистемы – I(1,2) - количество информации, которая связана с количеством информации в индивидуальном событии следующим образом:

$$I(1,2) = \overline{\ln ik(1,2)} \qquad (2.8)$$

Эту величину обычно просто называют информацией. Она широко известна в неравновесной статистической термодинамике [5]. Статистические (математические) свойства количества информации также достаточно известны [4], поэтому нет необходимости их приводить.

Выражение для энтропии сложной системы (2.8) в неравновесной статистической термодинамике известно как **S – теорема**. Общепринятая трактовка этой теоремы: энтропия равновесной системы (энтропия системы, состоящей из невзаимодействующих подсистем) равна сумме неравновесной энтропии (энтропии сложной системы) и информации. При этом величину информации считают положительной. Сумма неравновесной энтропии и информации постоянна и равна равновесной энтропии.

При изучении сложной системы такая трактовка неприменима. Неприменима сама постановка проблемы. В S - теореме рассматривают равновесную систему, у которой в результате неравновесных процессов уменьшается энтропия и увеличивается информация. Сложная система находится в метастабильном состоянии, которое не равновесно, однако возможность перехода сложной системы в абсолютно равновесное состояние (прекращение взаимодействия подсистем) не рассматривается.

Таким образом, сложная система может быть охарактеризована двумя параметрами, имеющими размерность энтропии: энтропией невзаимодействующих подсистем и информацией. <u>При этом величина информации отрицательна.</u>

Вывод основного уравнения термодинамики сложных систем основан на свойстве энтропии, а, следовательно, и логарифма фазового объема системы быть полным дифференциалом. Для сложной системы в целом справедливы все законы классической статистической термодинамики, поэтому энтропия сложной системы – полный дифференциал. Вывод основного уравнения термодинамики из микроканонического распределения проведен на основе [2]. В дальнейшем под фазовым объемом будет пониматься именно усредненный фазовый объем системы – в термодинамике рассматриваются именно усредненные параметры.

Из условия полного дифференциала и используя выражения для плотности вероятности микроканонического распределения, получим основное уравнение термодинамики сложной системы в статистическом смысле

$$d\ln\Gamma c = d\ln\Gamma 1 + d\ln\Gamma 2 + d\,I(1,2) =$$

$$= \frac{\partial \ln \Gamma 1}{\partial E1}\left(dE1 - \frac{\partial H1}{\partial a}da\right) + \frac{\partial \ln \Gamma 2}{\partial E2}\left(dE1 - \frac{\partial H1}{\partial a}da\right) + \frac{\partial I(1,2)}{\partial E_{вз}}\left(dE_{вз} - \frac{\partial H_{вз}}{\partial a}da\right) \quad (2.9)$$

Термодинамический смысл величины:

$$\frac{\partial I(1,2)}{\partial a} = \frac{\partial I(1,2)}{\partial E_{вз}}\left(\frac{\partial H_{вз}}{\partial a}\right) \quad (2.10)$$

остался невыясненным, как и смысл величины $\frac{\partial I(1,2)}{\partial E_{вз}}$.

Однако из соображений размерности можно утверждать, что это – температура. Обозначим эту температуру Ти .

Основное уравнение термодинамики сложных систем (термодинамическая форма):

$$d\,Sc = d\,S1 + d\,S2 + d\,I(1,2) = \frac{1}{T1}\left(dE1 - \frac{\partial H1}{\partial a}da\right) +$$

$$+ \frac{1}{T2}\left(dE2 - \frac{\partial H2}{\partial a}da\right) + \frac{1}{T_и}\left(dE_{вз} - \frac{\partial H_{вз}}{\partial a}da\right) \quad (2.11)$$

Очевидно, что это уравнение имеет свою специфику. Помимо выражений для невзаимодействующих подсистем в уравнении (2.22) присутствует выражение, учитывающее взаимодействие подсистем, то есть отражающее поведение квазиподсистемы. Оно представляет наибольший интерес, поскольку учитывает особенности сложной системы. **Если энергии подсистем постоянны, теплообмен отсутствует (энтропии подсистем постоянны), работа над подсистемами не производится и энергия взаимодействия имеет неоднозначную зависимость от энергий подсистем – то есть может изменять свою величину при постоянных энергиях подсистем, то основное уравнение термодинамики сложных систем приобретает вид**

$$d\,I(1,2) = \frac{1}{T_и}\left(dE_{вз} - \frac{\partial H_{вз}}{\partial a}da\right) \quad (2.12)$$

В этом уравнении полностью отсутствуют параметры невзаимодействующих подсистем. Это уравнение относится к квазиподсистеме и в явном виде отражает особенности сложной системы, связанные с энергией взаимодействия и изменением количества информации.

Уравнения (2.11) и (2.12) содержат две величины, термодинамический смысл которых не определен:

$\frac{\partial H_{вз}}{\partial a}$ и $\frac{\partial I(1,2)}{\partial E_{вз}}$

Величина $\frac{\partial H вз}{\partial a}$ имеет традиционную термодинамическую трактовку. Это – внешняя сила, действующая именно на квазиподсистему (так как связана именно с гамильтонианом взаимодействия). Эта сила возникает при изменении внешнего параметра а.

Величина $\frac{\partial I(1,2)}{\partial E вз}$ представляет особый интерес. Она имеет размерность температуры и в основном уравнении термодинамики занимает место температуры, но является ли она температурой и если да, то какой температурой? Может ли сложная система иметь две температуры?

Может. Как доказано в работах [9,10], сложные системы могут и должны характеризоваться не одной, а двумя температурами.

Помимо обычной температуры, которая служит потенциалом теплового взаимодействия, сложная система обладает другой температурой – связанной с количеством информации и энергией взаимодействия. Будем называть эту температуру информационной.

Возникает принципиальный вопрос: в какой мере можно считать информационную температуру температурой. Рассмотрим основные свойства температуры.

Температура - критерий равновесия. При равенстве обычных температур двух систем теплообмен между системами и изменение энтропии вследствие теплообмена невозможно. Уравнение (2.12) соответствует основному уравнению классической термодинамики при условии замены энтропии на информацию и обычной температуры – на информационную температуру. Изменение количества информации в квазиподсистеме сложной системы согласно этому уравнению возможно при изменении энергии взаимодействия либо при совершении работы.

При постоянстве внешних параметров а и постоянстве энергий невзаимодействующих подсистем у мультистационарной сложной системы, тем не менее, сохраняется возможность иметь различную энергию взаимодействия и, следовательно, различную структуру и различную информацию. Естественно предположить, что в этом случае изменение энергии взаимодействия подсистем происходит в результате особого информационного воздействия (воздействия аналогичного передаче теплоты). Потенциалом информационного воздействия служит информационная температура. (Отметим, что применение термина потенциал не означает наличия у температуры всех математических свойств потенциала).

Удостовериться в существовании информационной температуры (как впрочем, и любой физической величины) возможно только на основании экспериментальных результатов.

Введение информационной температуры приводит к тому, что изменение количества информации в сложной системе, связанное с мультистационарностью системы, получает термодинамическое обоснование. Информационное воздействие (по аналогии с тепловым) возможно лишь при существовании разности информационных температур, а сама информационная температура служит критерием равновесия взаимодействующих сложных систем при информационном контакте. При равновесии (равенстве информационных температур) количество информации в каждой взаимодействующей сложной системе сохраняется.

Размерность информационной температуры соответствует размерности обычной температуры. Информационная температура измеряется в единицах абсолютной температуры.

Абсолютная информационная температура отрицательна. Это следует из основного уравнения термодинамики сложных систем, поскольку количество информации – отрицательная величина.

Таким образом, сложная система помимо энтропии и обычной температуры характеризуется количеством информации и информационной температурой, которые являются термодинамическими координатой и потенциалом информационного воздействия. Информационное воздействие проявляется в изменении энергии взаимодействия количества информации в сложной системе.

Итак, в основном уравнении термодинамики для сложной системы фигурирует пара особых термодинамических величин: количество информации и информационная температура. Эти величины вместе с энергией взаимодействия полностью описывают особый тип воздействия (информационное воздействие), которое возможно осуществить на сложную систему.

Аддитивные системы, очевидно, в принципе не могут принимать информационное воздействие, поскольку у них отсутствуют как энергия взаимодействия подсистем, так и информация, как характеристика взаимодействия подсистем.

В отличие от информационной температуры математические, статфизические, динамические и термодинамические свойства информации достаточно хорошо изучены [7]. Информация в нашем понимании имеет только два отличия от традиционной трактовки: знак (она отрицательна) и то обстоятельство, что информация служит термодинамической координатой, описывающей метастабильное состояние сложной системы и квазиравновесный процесс информационного воздействия.

Основное уравнение термодинамики сложных систем приобрело физический смысл. Если свести две невзаимодействующие подсистемы в одну (с соответствующим изменением обозначений), уравнение примет вид:

$$d\,Sc = d\,Sн + d\,I(1,2) = \frac{1}{Tн}\left(dEн - \frac{\partial Hн}{\partial a}da\right) + \frac{1}{Tи}\left(dEвз - \frac{\partial Hвз}{\partial a}da\right) \qquad (2.13)$$

Уравнение (2.13) распадается на две части, которые описывают поведение невзаимодействующих подсистем и квазиподсистемы (то есть информационное взаимодействие).

Уравнение 2.13 можно записать в каноническом термодинамическом виде:

$$dE_c = dEн + dEвз = Tн\,d\,Sн - \frac{\partial Hн}{\partial a}da + Tи\,d\,I(1,2) - \frac{\partial Hвз}{\partial a}da \qquad (2.14)$$

Существуют особенности термодинамики сложных систем, которые имеют принципиальное значение.

Положительное и отрицательное информационное воздействие.

Вывод основных законов термодинамики сложных систем, относящихся к информационному воздействию, произведен по аналогии с тепловым воздействием. Однако в отличие от теплового воздействия – информационное воздействие имеет знак.

Положительное информационное воздействие увеличивает количество информации в сложной системе, увеличивает энергию взаимодействия, усложняет структуру системы.

Отрицательное информационное воздействие также увеличивает энергию сложной системы, но вызывает диссипативные процессы. В результате диссипации уменьшаются энергия взаимодействия и количество информации, следовательно, растут энтропия и энергия невзаимодействующих подсистем. Отрицательное информационное воздействие разрушает и упрощает структуру системы.

Информационная восприимчивость.

Теплоемкость – одно из ключевых понятий классической термодинамики.

По аналогии можно ввести информационную восприимчивость

$$Cи = Tи\,\frac{\partial I(1,2)}{\partial Tи} = \frac{\partial Eвз}{\partial Tи} \qquad (2.15)$$

Физический смысл информационной восприимчивости: степень изменения энергии взаимодействия и количества информации при повышении информационной температуры. Информационная восприимчивость характеризует способность сложной системы перестраиваться в результате информационного воздействия.

Информационная восприимчивость, как и само информационное воздействие, может быть положительной и отрицательной. Отрицательная информационная восприимчивость характеризует степень разрушения структуры сложной системы при повышении информационной температуры отрицательного воздействия.

3. Некоторые соотношения неравновесной термодинамики сложных систем. Сопоставление этих соотношений с результатами экспериментов профессора А.Б.Бурлакова на качественном уровне.

Логическая непротиворечивость и применение известных методов для построения теории сами по себе не являются достаточными аргументами для доказательства истинности этой теории. Необходимо сопоставление с результатами экспериментов. Очевидно, что информационное воздействие будет отчтливо проявляться между нативными объектами. Такие объекты не могут быть описаны в рамках равновесной термодинамики. Сопоставлять количественные соотношения теории и эксперимента также не представляется возможным. А.В.Бурлаков изучает влияние низкоинтенсивного лазерного излучения и собственного излучения растущих биологических объектов на процессы развития этих объектов [11,12]. Эти работы хорошо известны участникам Конгресса, поэтому ограничимся принципиальными выводами, которые следуют из экспериментов А.В. Бурлакова: воздействие низкоинтенсивного лазерного излучения и собственного излучения биологических объектов оказывает влияние на динамику процессов развития этих объектов, причем это влияние носит не детерминированный, а вероятностный характер.

Неравновесная термодинамика описывает процессы развития систем, причем процессы недетерминированного развития, развития, имеющего точки бифуркации. Известен универсальный критерий эволюции неравновесных термодинамических систем Пригожина и Гленсдорфа [8] связанный с производство энтропии, обусловленным изменением только термодинамических сил:

$$\frac{\partial xPs}{\partial t} \leq 0 \qquad (3.1)$$

где: Ps – производство энтропии, индекс x означает, что производство энтропии определяется только при изменении термодинамических сил (а не потоков).

Физический смысл этого критерия: в точке бифуркации система развивается в таком направлении, чтобы значение критерия эволюции было меньше нуля. При нескольких возможных вариантах развития наиболее вероятен вариант развивается системы с минимальным значением критерия (т.е. максимальным по абсолютной величине).

Для сложной системы производство энтропии, очевидно, будет иметь две составляющие: одну – производство энтропии невзаимодействующих подсистем (классической энтропии), другую – производство информации. Причем, производство информации, очевидно, будет отрицательным.

$$\frac{\partial xPsн}{\partial t} - \frac{\partial xPi}{\partial t} \leq 0 \qquad (3.2)$$

Рассмотрим, как этот универсальный критерий эволюции для сложной системы согласуется на качественном уровне с экспериментами А.В.Бурлакова.

Эффект интенсификации развития зародышей под воздействием низкоинтенсивного лазерного излучения. Этот эффект может быть описан и в рамках классической термодинамики.

Эффект интенсификации развития зародышей и избавления от дефектов развития под воздействием биологического излучения другой партии зародышей. Этот эффект не может быть описан в рамках классической термодинамики, поскольку тепловое воздействие обеих партий взаимно и, следовательно, взаимно компенсируется. Очевидно, положительное информационное воздействие уменьшает значение универсального критерия эволюции для партии дефективных зародышей и делает более вероятным ускоренное (по сравнению с контрольной партией) и более здоровое развитие. Уменьшение универсального критерия эволюции в этом случае возможно только за счет информационной составляющей этого критерия.

Эффект торможения развития зародышей. Зародыши с дефектами, несомненно, в какой-то степени обладают негативным информационным воздействием, в котором отражается наличие дефектов. Примечательно, что при информационном взаимодействии с партией дефективных зародышей развитие партии здоровых зародышей замедляется по сравнению с контрольной партией. Эффект замедления развития можно истолковать как результат отрицательного информационного воздействия. При этом необходимо отметить, что с очки зрения классической термодинамики тепловое излучение этих партий взаимно скомпенсировано.

Таким образом, на качественно уровне существует соответствие между экспериментальными данным и положениями неравновесной термодинамики сложных систем. Причем это соответствие относится именно к информационному взаимодействию.

Выводы.

Статистическая термодинамика сложных систем удовлетворяет поставленным в начале доклада задачам. Она не противоречит классической термодинамике и описывает свойства сложных систем, переходя к уравнениям и законам классической термодинамики как к предельному частному случаю (при отсутствии взаимодействия между подсистемами). Изучение свойств сложных систем позволило дать термодинамическое описание особого типа воздействия – информационного, присущего только сложным системам. Введение информационной температуры как потенциала взаимодействия и количества информации как термодинамической координаты позволило изучать информационное воздействие методами термодинамики.

Методы термодинамики дают возможность изучать информационное воздействие, не создавая детальные модели этого воздействия, а используя универсальные понятия количества информации и информационной температуры для количественного анализа информационного воздействия. При этом возможно применение всего мощного аппарата современной термодинамики. Следует отметить, что эффективное применение термодинамики к анализу информационного воздействия требует создания методики измерения информационной температуры, проведение большого количества измерений информационной восприимчивости, информационной температуры и количества информации взаимодействующих сложных систем. Однако такой подход дает возможность не только качественного анализа информационного взаимодействия сложных систем (как это было проведено в разделе 3 настоящего доклада), но и выявление количественных характеристик информационного взаимодействия.

Определение количественных характеристик информационного взаимодействия открывает широкие возможности для изучения этого черезвычайно важного явления.

Литература

1. Труды международного конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине» // С-Пб. 1997, 2000, 2003, 2006,2009
2. Терлецкий Я.П. Статистическая физика. М., 1994
3. Гиббс Дж. В. Основные принципы статистической механики. М., 1946
4. Яглом А.М., Яглом И.М. Вероятность и информация. М., 1973
5. Климонтович Ю.Л. Статистическая физика. М., 1982
6. Ландау Л.Д., Статистическая физика. М., 2005
7. Кадомцев Б.Б. Динамика и информация. М., 1997
8. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. М., 1975
9. Горовой Ю.М., Дьячкова С.И. Статистическая термодинамика сложных систем, Ярославль, 2007
10. Олемской А.И. Синергетика сложных систем: феноменология и статистическая теория. М., 2009
11. Особенности биологического действия спектральных составляющих сверхслабых излучений вьюна в раннем онтогенезе. А.Б. Бурлаков, А.А. Медведева, О.В.Бурлакова, Ю.И.Малахов, В.А.Голиченков. Сб. избранных трудов IV Конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине» // С-Пб. 2006
12. Возможность изменения индивидуального биологического времени слабыми электромагнитными излучениями. А.Б. Бурлаков, О.В.Бурлакова, В.А.Голченков. Сб. избранных трудов V Конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине» // С-Пб. 2009

STATISTICAL THERMODYNAMICS OF COMPLEX SYSTEMS (THERMODYNAMICS OF INFORMATIONAL INTERACTION)

Y.M. Gorovoy

Yaroslavl State Technical University, E-mail:gorovoyj@pochta.ru