

**Аннотация.** Представлены математические модели нестационарного тепло- и массообмена в воздухоохладителях парокompрессорных холодильных агрегатов для охлаждения зерна при хранении. Проведены расчеты изменения параметров воздуха во времени.

**Ключевые слова:** воздухоохладитель, испаритель, хладагент, воздух, расход энергоносителей

## MATHEMATICAL MODELING AND CALCULATION OF AIR COOLERS DYNAMIC MODE COOLING GRAIN STORAGE

**V. Gryschenko,  
B. Kotov**

**Annotation.** Mathematical models of non-stationary heat and mass transfer in the air cooler vapor compression refrigeration units to cool the grain in storage. The calculations of changes in air parameters in time.

**Keywords:** air cooler, evaporator, refrigerant, air, energy costs

УДК 536(0758)

## АНАЛИЗ ФАЗОПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНЫХ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ ОТНОШЕНИЙ

**Б. Х. ДРАГАНОВ**, доктор технических наук, профессор  
Национальный университет биоресурсов  
и природоиспользования Украины

**В. Г. ДЕМЧЕНКО**, кандидат технических наук  
Институт технической теплофизики НАН Украины

**Аннотация.** Приведён анализ фазовых переходов на основе положений Гиббса. Изложена теория поверхностных процессов адсорбций. Даны основные сведения о принципах метода линейных феноменологических соотношений, основанных на положениях неравновесной термодинамики. Исследуется процесс тепломассообмена многокомпонентных сред. Исследованы условия производства энтропии в анализируемых процессах.

**Ключевые слова:** фазовый переход; потенциал Гиббса; адсорбция; соотношение Онсагера; феноменологическая зависимость; поток; термодинамическая сила; коэффициенты взаимности; энтропия; производство энтропии

Исследование процессов тепломассообмена в многокомпонентных средах является актуальной научной задачей. Существенный вклад в теорию фазовых переходов внёс У. Гиббс, который предложил соотношение, выполняемое в любой гомогенной части системы.

**Цель исследований** - разработать метод исследования процессов теплообмена в многокомпонентных средах при фазовых переходах методом неравновесной линейной термодинамики.

**Материалы и методика исследований.** У. Гиббс рассматривал гетерогенную систему, состоящую из различных веществ массами  $m_1, m_2, \dots, m_n$ . [1]. Полагая, что изменение энергии  $dU$  некоторой гомогенной части должно быть пропорционально изменению масс вещества  $dm_1, dm_2, \dots, dm_n$ , он предложил следующее соотношение [2]:

$$dU = TdS - pdV + \mu_1 dm_1 + \mu_2 dm_2 + \dots + \mu_n dm_n, \quad (1)$$

где  $S$  – энтропия;

$T$  – температура;

$\mu$  - химический потенциал.

Приведённые зависимости следует выразить с помощью молярных величин. Запишем соотношение (1), выразив количество вещества в молях:

$$dU = TdS - pdV + \sum_{k=1}^n \mu_k dN_k. \quad (2)$$

Чтобы провести различие между необратимым обменом с внешней средой, выразим материальные изменения в молях  $dN_k$  в виде:

$$dN_k = d_i N_k + d_e N_k.$$

Соответственно:

$$dS = d_i S + d_e S, \quad (3)$$

$$d_e S = \frac{dU + pdV}{T} - \sum_{k=1}^n \mu_k d_e N_k, \quad (4)$$

$$d_i S = -\frac{1}{T} \sum_{k=1}^n \mu_k d_i N_k > 0. \quad (5)$$

Рассмотрим процесс адсорбции. При термодинамическом анализе сорбционных систем часто различали адсорбцию в поверхностном слое (макропористые сорбенты) и в объёме микропор (микропористые сорбенты). В свойствах сорбционных фаз обоих типов имеется глубокая аналогия принципиально отличающихся от обычных объёмных фаз: давление в плоскости поверхностного слоя и, по крайней мере, в некоторых направлениях в объёмной сорбционной фазе отличается от общего давления  $p$  в системе. Поэтому, в обоих случаях фундаментальные уравнения должны содержать член  $\sigma dW$ , учитывающий дополнительную работу образования поверхностного слоя ( $\sigma$  - поверхностное натяжение,  $W$  - площадь поверхности) или "объёмной" сорбционной фазы в микропорах ( $\sigma$  - внутреннее давление,  $W$  - объём сорбционной фазы) [3]:

$$dU = TdS - pdV + \sum_i \mu_i dn_i + \sum_i \bar{\varphi}_i d\bar{n}_i + \sigma dW, \quad (6)$$

$$dG = -SdT - Vdp + \sum_i \mu_i dn_i + \sum_i \bar{\varphi}_i d\bar{n}_i + \sigma dW, \quad (7)$$

и соответственно

$$\bar{S}dT - \bar{V}dp + \sum_i \bar{n}_i d\bar{\varphi}_i + Wd\sigma = 0. \quad (8)$$

Полные химические потенциалы компонентов сорбционного раствора должны быть представлены в виде [4]:

$$\bar{\varphi}_i = \bar{\mu}_i^0(T, p) + RT \ln \bar{c}_i \bar{\gamma}_i - \int_0^\sigma s_i d\sigma = \bar{\mu}_i - s_i \sigma, \quad (9)$$

$$\bar{\varphi}_i = \bar{\mu}_i^0(T, p) + RT \ln \bar{x}_i \bar{\gamma}_{ix} - \int_0^\sigma s_i d\sigma = \bar{\mu}_i - s_i \sigma. \quad (10)$$

Парциальные мольные площади или объёмы ( $s_i$ ) компонентов сорбционного раствора в общем случае могут зависеть от его состава. Однако, поскольку такая зависимость выражена, как правило, весьма слабо, а вид соответствующей функции неизвестен, можно не нарушая термодинамической строгости рассмотрения, принять модель жёсткого сорбционного раствора, т. е.  $s_i = const$ . Возможные отклонения от принятой модели полностью учитываются соответствующими коэффициентами активности. При таком общепринятом в настоящее время подходе возможен переход к правым частям уравнения (9) и (10). При расчётах  $\bar{\gamma}_i$  и  $\bar{\gamma}_{ix}$  применяют стандартные значения.

**Результаты исследований.** Заслуживает внимания задача анализа фазовых превращений с позиции неравновесной термодинамики.

Для состояний вблизи равновесий между потоками и силами линейные однородные состояния сформулированы Онсагером [5]:

$$j_i = \sum L_{ij} x_j, \quad (11)$$

где  $j_i$  - поток;

$x_j$  - силы;

$L_{ij}$  - линейные коэффициенты взаимности.

В линейной термодинамике необратимых процессов утверждается, что для коэффициентов взаимности справедливо [6]:

$$L_{ij} = L_{ji}, \quad (12)$$

т. е. если на поток  $L_i$ , соответствующий необратимому процессу  $i$ , действует сила  $x_j$  необратимого процесса  $j$ , то сила  $x_j$  действует на поток  $j_i$  с тем же коэффициентом  $L_{ij}$ .

Важность соотношений Онсагера кроется в их общности. Они выдержали многочисленные экспериментальные проверки. Справедливость соотношений Онсагера впервые показала, что неравновесная термодинамика так же, как и равновесная термодинамика, приводит к общим результатам, не зависящим от выбора конкретной молекулярной модели.

Исходя из формулы Гиббса, следует отношение:

$$\frac{d_i S}{dt} = \sum_i x_j j_j, \quad (13)$$

где  $j_j$  - скорости различных необратимых процессов (химических реакций, тепловых потоков, диффузии т. д.), протекающих в системе,  $x_j$  - соответствующие обобщённые силы (средства, градиенты температур, химических потенциалов т. д.).

Это основная формула макроскопической термодинамики необратимых процессов.

Соотношение Онсагера проверено многочисленными проведёнными экспериментами. Существенно то, что эти соотношения выражают некое общее свойство, не зависящее от выбора молекулярной модели. Именно эта универсальность придаёт соотношениям взаимности характер термодинамического результата.

Чтобы проиллюстрировать важную особенность линейных неравновесных систем, обратимся к теореме о минимуме производства энтропии.

Принцип Онсагера применим для анализа более сложных структур, к примеру, для случая сопряжённых сил и потоков. Рассмотрим систему, состоящую из двух сил и сопряжённых с ними потоками. Обозначим действующие силы через  $x_k$  и  $x_m$ , а потоки через  $j_k$  и  $j_m$ .

Производство энтропии определяется отношением:

$$\frac{d_i S}{dt} = j_k x_k + j_m x_m \quad (14)$$

с линейными феноменологическими законами:

$$j_k = L_{11} x_k + L_{12} x_m, \quad j_m = L_{21} x_k + L_{22} x_m. \quad (15)$$

В стационарном состоянии поток вещества обращается в ноль:

$$j_m = L_{21} x_k + L_{22} x_m = 0. \quad (16)$$

Коэффициенты  $L_{11}$ ,  $L_{12}$ ,  $L_{21}$ ,  $L_{22}$  - измеримые величины, и, следовательно, мы можем проверить и убедиться, что соотношение  $L_{12} = L_{21}$  действительно выполняется.

В заключении заметим, что в термодинамике необратимых процессов применительно к системам с малыми неравновесностями используются следующие принципы.

1. Принцип линейности, согласно которому термодинамические потоки  $j_{(v)}$  определяются линейными зависимостями от термодинамических сил  $x_{(\lambda)}$ :

$$j_{(v)} = \sum_{\lambda} L_{(v\lambda)} x_{(\lambda)}, \quad (17)$$

где  $L_{(v\lambda)}$  называются феноменологическими коэффициентами, причём  $L_{(1\lambda)}$  и  $L_{(2\lambda)}$  ( $\lambda = 1, 2$ ) образуют тензоры 4-го ранга.

2. Принцип симметрии Кюри, согласно которому потоки и термодинамические силы различной тензорной размерности не могут быть связаны друг с другом. Этот принцип основан на свойстве изотропности смеси. В неравновесную термодинамику этот принцип введён Пригожиным.

3. Принцип взаимности Онсагера, согласно которому феноменологические коэффициенты для перекрёстных эффектов удовлетворяют условию симметрии типа:

$$L_{(v\lambda)} = L_{(\lambda v)}. \quad (18)$$

Доказательство этих трёх принципов для гомогенных (газовых) сред основано на анализе уравнений, описывающих микропроцессы, т. е. молекулярно-кинетические процессы. В частности, доказательство принципа симметрии Кюри основано на свойстве изотропности среды, а принципа взаимности Онсагера - на обратимости микропроцессов. В связи с последними отметим, что в гетерогенных средах необратимость обычно проявляется уже на уровне микропроцессов (в масштабах капель, частиц, пузырьков и т. д.), поэтому для гетерогенных сред принцип взаимности Онсагера, по-видимому, нарушается [8].

Соответственно, в рамках феноменологической теории уравнение эволюции удельной энтропии в непрерывной системе имеет вид:

$$\rho dS / dt = j_{(s)j} + \sigma_{(s)}, \quad (\sigma_{(s)} \geq 0), \quad (19)$$

в котором  $j_{(s)j}$  - соответствующие вектора субстанциональной плотности потока энтропии, причём дивергенция  $j_{(s)j}$  описывает обратимый теплообмен между рассматриваемой системой и внешней средой, а неравенство  $\sigma_{(s)} \geq 0$ , где  $\sigma_{(s)}$  - производство энтропии, соответствует второму закону термодинамики, который гласит, что энтропия замкнутой системы не может уменьшаться.

Для определения потоков и сопряжённых им термодинамических сил используется обычно конкретное представление скорости производства (плотности источника) энтропии  $\sigma_{(s)}$  внутри системы в рассматриваемом необратимом процессе в виде билинейной формы [9]:

$$T\sigma_{(s)} = \sum_{k=1}^Q J_k X_k \geq 0. \quad (20)$$

Причём, после того как определены потоки  $J_k$ , сопряжённые им силы  $X_k$  находится  $\sigma_{(s)}$ .

По поводу применимости тождества Гиббса для неравновесных процессов в непрерывной термодинамической системе отметим следующее. Согласно принципу квазилокального равновесия (основного постулата неравновесной термодинамики) всю систему можно разбить на достаточно малые макроскопические области, каждую из которых можно рассматривать как равновесную (точнее квазиравновесную) термодинамическую систему.

Следует также отметить, что гипотеза о локальном равновесии среды эквивалентна предложению о справедливости не только соотношения Гиббса, но и всех остальных термодинамических соотношений для бесконечно малых областей неравновесной системы.

### Выводы

Анализ фазовых переходов, в том числе и явления адсорбции следует выполнять методами неравновесной термодинамики. Вывод обобщённых соотношений на основе феноменологических отношений Онсагера позволяет получить важные алгебраические соотношения, решения которых не представляют сложности. Эти решения справедливы для широкого класса сред, например, многокомпонентных газовых смесей. Характеристикой необратимости неравновесных сред служит производство энтропии.

### Список литературы

1. Gibbs I. On the equilibrium of heterogeneous substances. / I. Gibbs // Trans Conn. Acad. Sci. III-343-524, 1875
2. Пригожин И. Химическая термодинамика / И. Пригожин, Р. Дефэй // Новосибирск: Наука, 1966. – 504 с.
3. Толмачёв А. М. Феноменологическая термодинамика адсорбции / А. М. Толмачев // Адсорбция в микропорах. – М.: Наука, 1983. – С. 26 - 45.
4. Русанов А. И. Фазовые равновесия и поверхностные явления / А И Русанов. – Л.: Химия, 1967. - 388 с.
5. Onsager L. Reciprocalrelationsinirreversibleprocesses. L. Phys. Rev., 37, 405 – 426, 1931.
6. ДеГроотС. Неравновесная термодинамика / С. ДеГроот, П. Мазур. –М.: Мир, 1964. – 426 с.
7. Curie P. Oeuvres de Piere Curie. – Paris: Gauthiers Villars, 1908, 621 p.
8. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. / Р. И. Нигматулин. – Ч.1.–М.: Наука,1987. – 464 с.

9. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до структур / И. Пригожин, Д. Кандепуди. – М.: Мир, 2002. – 461 с.

### References

1. Gibbs, I. (1875). On the equilibrium of heterogeneous substances. Trans Comn. Acad. Sci. III-343-524.
2. Prigozhin, I., Def-ey, R. (1966). Khimicheskaya termodinamika [Chemical thermodynamics]. Novosibirsk: Nauka, 504.
3. Tolmachev, A. M. (1983). Fenomenologicheskaya termodinamika adsorbtsii [Phenomenological thermodynamics of adsorption]. Adsorbtsiya v mikroporakh. Moskow: Nauka, 26 - 45.
4. Rusanov, A. I. (1967). Fazovyye ravnovesiya i poverkhnostnyye yavleniya [Phase equilibria and surface phenomena]. Leningrad: Khimiya, 388.
5. Onsager L. (1931). Reciprocalrelationsinirreversibleprocesses. L. Phys. Rev., 37, 405 – 426.
6. De Groot, S., Mazur, P. (1964). Neravnovesnaya termodinamika [Non-equilibrium thermodynamics]. Moskow: Mir, 426.
7. Curie, P. (1908). Oeuvres de Piere Curie. Paris: Gauthiers Villars, 621.
8. Nigmatulin. R. I. (1987). Dinamika mnogofaznykh sred. Ch.1. [Non-equilibrium thermodynamics]. Moskow.: Nauka, 464 .
9. Prigozhin, I., Kandepudi, D. (2002). Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigateley do struktur [Modern thermodynamics. From Heat Engines to structures]. Moskow: Mir, 461.

## АНАЛІЗ ФАЗОПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ ЛІНІЙНИХ ФЕНОМЕНОЛОГІЧНИХ ВІДНОСИН

**Б. Х. Драганов,  
В. Г. Демченко**

**Анотація.** Наведено аналіз фазових переходів на основі положень Гіббса. Викладена теорія поверхневих процесів адсорбції. Подано основні відомості про принципи методу лінійних феноменологічних співвідношень, заснованих на положеннях нерівноважної термодинаміки. Досліджується процес тепломасообміну багатоконпонентних середовищ. Досліджено умови виробництва ентропії в аналізованих процесах.

**Ключові слова:** фазовий перехід; потенціал Гіббса; адсорбція; співвідношення Онсагера; феноменологічна залежність; потік; термодинамічна сила; коефіцієнти взаємності; ентропія; виробництво ентропії

## ANALYSIS OF PHASE TRANSITION PROCESS ON THE BASIS OF LINEAR PHENOMENOLOGICAL RELATIONS

**B. Draganov,  
V. Demchenko**

**Annotation.** The above analysis of phase transitions based on the provisions of Gibbs. The theory of surface adsorption process. Are given basic

information on the principles of the method of linear phenomenological relations, based on the provisions of nonequilibrium thermodynamics. The processes teplotomasloobmena multicomponent media. The conditions for the entropy production in the analyzed processes.

**Keywords:** *phase transition; Gibbs potential; adsorption; Onsager relationship; phenomenological dependence; flow; thermodynamic forces; reciprocity factors; entropy; entropy production*

УДК 004.89+65.011.46

## **СИНТЕЗ ЕФЕКТИВНИХ СТРАТЕГІЙ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ КОМПЛЕКСАМИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ НЕЧІТКИХ КОГНІТИВНИХ КАРТ**

**Н. А. ЗАЄЦЬ**, кандидат технічних наук, доцент<sup>16</sup>  
*Національний університет біоресурсів  
і природокористування України*  
e-mail: z-n@ukr.net

**Анотація.** Проаналізовано перспективи використання нечітких когнітивних карт для сценарного управління технологічними комплексами харчових виробництв. З метою підвищення ефективності роботи нечітких когнітивних карт запропоновано оптимізацію вибору (узагальнення) декількох експертних думок з використанням нейромережових рішень; розроблена методика і алгоритм використання нейронних мереж. Побудована структура нечіткої когнітивної карти сценарного управління технологічним комплексом; експертно визначені зв'язки між концептами. Апробовано методику побудови адекватної нейронної мережі Кохонена оптимізації вибору експертних думок щодо значень зв'язків між концептами - визначено їх чисельні значення. Запропоновано схему використання нейронних мереж Байєса для вибору в режимі реального часу значень впливу одного концепту на інший.

**Ключові слова:** *нечіткі когнітивні карти, нейронна мережа, адаптація параметрів, сценарії управління, множина концептів, карти Кохонена, вагові коефіцієнти, середньоквадратична похибка, навчальна вибірка, контрольна вибірка, імовірнісні нейронні мережі*

Найважливішим процесом, що зв'язує всі основні функції управління складними технологічними комплексами (ТК) харчових виробництв, є розробка управлінських рішень, оскільки саме швидкість прийняття рішень визначає ефективність роботи комплексу. Існуючі системи управління не