

*Для підвищення надійності електропостачання розроблено алгоритм реалізації контролю успішного АПВ секціонувального вимикача ЛЕП.*

***Ключові слова: підвищення надійності електропостачання, дистанційний контроль успішного автоматичного повторного включення секціонувального вимикача***

## **ALGORITHM AND THE BLOCK DIAGRAM REMOTE CONTROL SUCCESSFUL AUTOMATIC RECLOSING SECTIONALIZING CUTOUTS POWER LINES**

***I. Fomin, V. Zelyukin, R. Belikov***

*In order to increase reliability of power supply control of the implementation of the algorithm of successful reclosing partitioned switch lines.*

***Keywords: improving the reliability of power supply , remote control of a successful auto-reclose circuit breaker partitioned***

УДК 536(075.8)

## **К ВОПРОСУ О ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ**

***В.Г. Демченко, кандидат технических наук  
Институт технической теплофизики НАН Украины  
Б.Х. Драганов, доктор технических наук  
Национальный университет биоресурсов  
и природопользования Украины  
e-mail: nni.elektrik@gmail.com***

*Выполнен термодинамический анализ фазовых переходов, в том числе при переходах пар – жидкость (жидкость – пар). Приведен химический потенциал Гиббса для определения процесса массообмена в гетерогенных средах.*

***Ключевые слова: фазовый переход, гетерогенная система, химический потенциал, теплообмен, правило фаз Гиббса, теорема Дюгена, пористая среда, энтропия***

Фазовые переходы имеют место в большинстве теплофизических и химико–физических явлениях. Поэтому в настоящее время исследования фазовых переходов выделились в обширную интересную область науки. Условия (температура и давление), при которых вещество существует в

различных фазах (газ, жидкость или твердое тело), представляют в виде фазовой диаграммы [1, 6].

**Цель исследований** – анализ фазовых переходов на основе термодинамического метода.

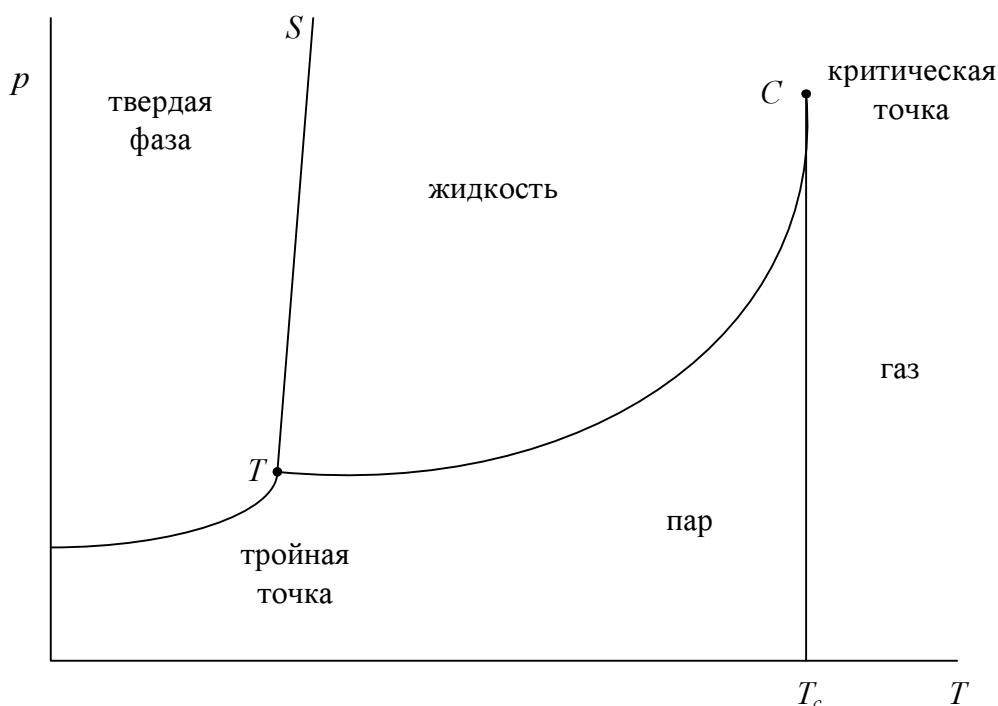
**Результаты исследований.** Рассмотрим равновесие между жидкой и газоподобной фазами (см. рисунок). Система закрыта и при фиксированной температуре состоит только из жидкости и пара, находящихся в равновесии.

Когда температура приближается к  $T_c$ , равновесие приближается к критическому состоянию  $C$ .

Рассмотрим гетерогенную систему, в которой две фазы занимают разные объемы. При этих условиях жидкость необратимо превращается в пар или наоборот; процесс идет до тех пор, пока между двумя фазами не наступает равновесие. Обмен веществом между двумя фазами можно рассматривать как «химическую реакцию», уравнение которой условно запишем в виде:



т. е. пар = жидкость. Обозначим: газ –  $G$ , пар –  $П$ , жидкую фазу –  $Ж$ , твердую –  $S$ . Обмен веществом между фазами называют фазовой реакцией. Фазовые реакции используют для количественного описания превращения фаз.



### Фазовая диаграмма однокомпонентной системы:

$p - T$  – равновесные кривые (во всех точках на этих кривых химические потенциалы равновесных фаз равны);  $T$  – тройная точка;  $C$  – критическая точка;  $T_c$  – критическая температура, выше которой газ невозможно перевести в жидкое состояние, увеличивая давление

Пусть  $\mu_k^{\text{II}}$  и  $\mu_k^{\text{Ж}}$  – химические потенциалы вещества  $k$  в двух фазах. Индексы «II» и «Ж» означают паровую и жидкую фазы. В равновесии производство энтропии любым необратимым процессом должно обратиться в нуль. Отсюда следует, что химическое сродство, соответствующее фазовому переходу жидкость – пар, должно обратиться в нуль, т.е.

$$A = \mu_k^{\text{Ж}}(p, T) - \mu_k^{\text{II}}(p, T) = 0; \quad (2)$$

$$\mu_k^{\text{Ж}}(p, T) = \mu_k^{\text{II}}(p, T),$$

где в явном виде указано, что оба химических потенциала – функции от давления и температуры. Из равенства химических потенциалов следует, что когда жидкость находится в равновесии со своим паром давление и температура на являются независимыми переменными, и поэтому на фазовой диаграмме и появляется равновесная кривая  $TC$ .

Между фазами происходит массообмен.

Примерами переноса массы между фазами являются испарение жидкости в газ (газ-жидкость), массообмен между твердой поверхностью конструкционного материала и теплоносителем. При движении вещества из одной фазы в другую возникает сопротивление внутри каждой фазы и на их границе. В некоторых задачах массообмена принимают сопротивление межфазной границы пренебрежимо малым, что подтверждается опытными данными реальных систем. Исключение составляют системы, в которых на границе наблюдаются какие-либо отложения, примеси поверхностно-активных веществ, коррозионные процессы и т.д. При распространении тепла, например, из жидкости в газ возникает непрерывное поле температур. Температура на границе фаз одинакова для каждой фазы ( $T_{\text{ст}}$ ). Общее термическое сопротивление (величина, обратная коэффициенту теплопередачи) может быть представлена как сумма термических сопротивлений со стороны каждой фазы.

Сумма коэффициентов теплообмена с каждой стороны:

$$1/k = 1/a' + 1/a''. \quad (3)$$

Плотность теплового потока

$$q = k(T' - T'').$$

В случае массопереноса, если две фазы находятся в равновесии и сопротивление переносу массы на границе отсутствует, концентрации на границе не равны. Это объясняется тем, что в качестве движущего потенциала выбрана именно концентрация – движущий потенциал для массопереноса лишь внутри фазы, но не между фазами. Правильнее рассматривать в качестве движущей силы разницу химических потенциалов.

Разность между объемной и поверхностной концентрациями вещества в каждой фазе может быть выражена через плотность потока массы  $j$  и локальные коэффициенты массопереноса в каждой фазе  $\beta'$ ,  $\beta''$ .

Содержание влаги в воздухе можно определить психрометрическим методом, в основу которого положено измерение температуры с помощью сухого и мокрого термометров. Если все тепло, идущее на испарине, подводится за счет конвекции, то поток массы с единицы поверхности и плотность теплового потока определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} j &= \beta \rho (d_s - d); \\ q &= \alpha (t - t_M) = jr, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $d$  – влагосодержание (масса водяного пара в 1 кг сухого воздуха);  $d_s$  – влагосодержание насыщенного воздуха;  $t$ ,  $t_M$  – температуры сухого и мокрого термометров;  $r$  – теплота испарения воды при данном давлении.

Отсюда имеем

$$\frac{t - t_M}{d_s - d} = \frac{r\beta}{\alpha} \approx \frac{r}{c_p}, \quad (5)$$

Введем понятие химического потенциала. С перераспределением массы происходит перераспределение энергии в системы. Масса, являющаяся количественной мерой изменения, претерпеваемого системой, рассматривается как координата состояния. В качестве потенциала массы Дж. У. Гиббс предложил величину  $\mu$ , называемую химическим потенциалом. Количество массообменного воздействия определяется в виде  $\mu dm$ , где  $m$  – масса [4].

Если система является гетерогенной, состоящей из нескольких компонентов, первый закон термодинамики запишется так:

$$dU = TdS = pdV + \sum_{k=1}^n \mu_k dm_k, \quad (6)$$

где  $U$  – внутренняя энергия;  $T$  – температура;  $S$  – энтропия;  $p$  – давление;  $V$  – объем;  $k$  – компонент;  $\mu_k$  – химический потенциал компонента  $k$ ;  $m_k$  – масса компонента  $k$ .

Изобарно-изотермический потенциал Гиббса выражается так:

$$dG = Vdp - SdT. \quad (7)$$

Для равновесного процесса  $dG = 0$ .

Ясно, что равенство химических потенциалов (2) должно выполняться между любыми двумя фазами, находящимися в равновесии. Если бы имелось  $P$  фаз, то выполнялось бы общее условие равновесия:

$$\mu_k^1(p, T) = \mu_k^2(p, T) = \mu_k^3(p, T) = \dots \mu_k^P(p, T). \quad (8)$$

где верхней индекс указывает фазу, а нижний – компонент.

На рисунке можно заметить еще одну интересную особенность: имеется критическая точка  $C$ , в которой заканчивается равновесная кривая  $TC$  (между жидкой и паровой фазами). Если температура газа выше  $T_c$ , то газ невозможно сжать (перевести в жидкость) путем увеличения давления: при увеличении давления плотность возрастает, но переход в конденсаторную фазу не происходит.

В однофазной системе, где имеется, например, только газ, интенсивные переменные – давление и температура – могут изменяться независимо. Но когда в равновесии находятся две фазы, например пар и жидкость,  $p$  и  $T$  перестают быть независимыми. Так как химические потенциалы двух фаз должны быть равны, т.е.  $\mu^1(p,T) = \mu^2(p,T)$ , независима только одна из двух интенсивных переменных. Число независимых интенсивных переменных связано с числом фаз, находящихся в равновесии, и числом компонентов в системе.

Кроме правила фаз, открытого Гиббсом, существует еще одно замечание, сделанное Пьером Дюгемом, и получившее название теоремы Дюгема. Она формулируется так: при любом числе фаз, компонентов и химических реакций, если начальное число молей  $N_k$  всех компоненты задано, равновесное состояние закрытой системы полностью определяется двумя независимыми переменными.

Отметим, что правило фаз Гиббса определяет полное число независимых интенсивных переменных, а теорема Дюгема – полное число независимых интенсивных и экстенсивных переменных в закрытой системе.

Различают фазовые переходы первого и второго рода [2]. Химический потенциал при фазовых переходах первого рода изменяется непрерывно, но его производная имеет разрыв.

Характерные особенности фазовых переходов второго рода заключается в том, что в этом случае изменения термодинамических величин не столь значительны: изменения молярной энтропии  $S_m$  и молярного объема  $V_m$  непрерывны, но их производные имеют разрывы. Аналогично, имеет разрыв вторая производная химического потенциала.

В результате фазовых переходов, как правило, происходит изменение симметрии системы, которое характеризуется так называемым параметром порядка. Последний обычно выбирают так, чтобы он был равен нулю по одну сторону фазового перехода.

В системе жидкость – жидкость или жидкость – пар и пар – жидкость симметрия не изменяется. Деление фазовых переходов на два рода несколько условно, так как в жидкокристаллических системах известны фазовые переходы первого рода, очень близкие к фазовым переходам второго рода. Это переходы с малым скачком параметра порядка и малыми теплотами при сильно развитых флуктуациях.

В некоторых системах, например в адсорбционных тепловых насосах, в пористых аккумуляторах тепла, эффективность энергетических систем в основном определяется уровнем протекающих фазовых переходов.

Отметим, что пористые среды играют существенную роль не только в технических областях, но и в природе, в биологии и заслуживают всестороннего анализа.

Исходная система уравнений записывается так:

– в направлении  $Z$  :

$$; \frac{\partial}{\partial Z}(VU) + \frac{1}{R^n} \frac{\partial}{\partial R}(R^n VU) = -\frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{1}{\text{Re}} \left[ \frac{\partial}{\partial Z} \left( \frac{\partial U}{\partial Z} \right) + \frac{1}{R^n} \frac{\partial}{\partial R} \left( R^n \frac{\partial U}{\partial R} \right) \right] - f \frac{U}{D_a \text{Re}}; \quad (9)$$

– в направлении  $R$ :

$$\frac{\partial}{\partial Z}(UV) + \frac{1}{R^n} \frac{\partial}{\partial R}(R^n VU) = -\frac{\partial P}{\partial R} + \frac{1}{\text{Re}} \left[ \frac{\partial}{\partial Z} \left( \frac{\partial V}{\partial Z} \right) + \frac{1}{R^n} \frac{\partial}{\partial R} \left( R^n \frac{\partial V}{\partial R} \right) \right] - f \frac{V}{D_a \text{Re}} - f \frac{V}{\text{Re} R^2} n; \quad (10)$$

– уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial Z}(U\Theta) + \frac{1}{R^n} \frac{\partial}{\partial R}(R^n V\Theta) = \frac{1}{P_e} \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Z^2} \right) + \frac{1}{P_e R^n} \frac{\partial}{\partial R} \left( R^n \frac{\partial \Theta}{\partial R} \right); \quad (11)$$

– генерация энтропии:

$$E_g = \left( \frac{\partial \Theta}{\partial Z} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Theta}{\partial R} \right)^2 + (1-f) Br_m \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial V}{\partial R} \right)^2 + \left( \frac{V}{R} n \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial Z} \right)^2 \right] + \left[ \frac{\partial V}{\partial Z} + \frac{\partial U}{\partial R} \right]^2 \right\} + f \frac{Br_m}{D_a} [\bar{V}]^2. \quad (12)$$

В уравнениях (8 – 12) приняты обозначения:

$Z = z/z_{in}$ ;  $U = u/u_{in}$ ;  $V = v/v_{in}$ ;  $R = r/r_{in}$ ;  $\Theta = (T - T_{in})/T_w - T_{in}$ ;  $P = p/p_{in}$ ;  $\Theta = (T - T_{in})/T_w - T_{in}$ ;  $P = p/p_{in}$ ;  $D_a$  – число Дарси;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $Br_m$  – преобразованное число Бринкмана,  $z$  и  $r$  – координаты ( $r$  – радиус);  $u$ ,  $v$  – компоненты скорости;  $\rho$  – плотность;  $f$  – параметры, определяющие степень пористости исследуемого тела.

Энтропийный метод анализа энергетических систем получил особое развитие в последние два-три десятилетия благодаря научным работам А. Бежана и Т. Морозюк [3, 5].

## Выводы

Приведенные закономерности фазовых переходов могут служить основой для более полного и правильного решения указанных процессов. Оценку уровня фазовых переходов рекомендуется основывать на энтропийном анализе.

## Список литературы

1. Пригожин И. Современная термодинамика от тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – М.: Мир, 2002. – 461 с.
2. Стенли Г. Фазовые переходы и критические явления / Г. Стенли; пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 425 с.
3. Bejan A. Entropy generation minimization in heat transfer. In: E. Sciubba, M. Moran (Eds.) second Law Analysis of Energy systems: toward the 21<sup>st</sup> century. Proceedings of International Conferences ROMA', 1995. – P. 363 – 372.
4. Gibbs J.W. On the equilibrium of heterogeneous substance. Trans. Conn. Aco. d. Sci, III, 1828. – P. 343-524.

5. Morosuk T. Entropy generation in conduits filled with porous medium totally and partially/International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005). – P. 2548 – 2560.

6. Prigogine J., Defay R. Chemical Thermodynamics. 2 th. ed. – London: Longman, 1967. – 211 p.

## ДО ПИТАННЯ ПРО ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ

*В.Г. Демченко, Б.Х. Драганов*

*Виконано термодинамічний аналіз фазових переходів, у тому числі при переходах пара – рідина (рідина – пара). Наведено хімічний потенціал Гіббса для визначення процесу масообміну в гетерогенних середовищах.*

*Ключові слова: фазовий перехід, гетерогенна система, хімічний потенціал, тепломасообмін, правило фаз Гіббса, теорема Дюгена, пористе середовище, ентропія*

## ON THE PROBLEM OF PHASE TRANSITIONS

*V. Demchenko, B. Draganov*

*A thermodynamic analysis of phase transitions, including the transitions vapor - liquid (liquid - vapor). Shows the chemical Gibbs potential to determine the mass transfer process in heterogeneous environments.*

*Keywords: phase transition, heterogeneous system, the chemical potential, heat and mass transfer, Gibbs phase rule, Theorem Dyugena, porous medium, entropy*

УДК 621.316.542.9:621

## ЗАПРЕТ ВКЛЮЧЕНИЯ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ АВР ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ КОНТРОЛЕ АВАРИЙНЫХ ОТКЛЮЧЕНИЙ В ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

*И.Н. Фомин, инженер  
ФГБОУ ВПО «Орловский государственный аграрный  
университет»  
e-mail: gaalx@ukr.net*

*Разработан способ дистанционного контроля работы выключателей, осуществляемый путем сравнения длительности проте-*