

Литература

1. Коровин, Н. В. Новые химические источники тока [Текст] / Н. В. Коровин. — К.: Энергия, 1978. — 194 с.
2. Варламов, Р. Г. Малогабаритные источники тока [Текст] / Р. Г. Варламов, В. Р. Варламов. — М.: Радио и связь, 1988. — 194 с.
3. Наумов, А. В. Обзор мирового рынка кадмия [Текст] / А. В. Наумов // Известия вузов. Цветная металлургия. — М.: Книга, 2006. — № 1. — С. 18–23.
4. Козуб, С. Н. Современное состояние аналитической химии кадмия [Текст] / С. Н. Козуб, А. А. Лавренко, Г. И. Гринь, П. А. Козуб и др. // Вісник НТУ «ХПІ». — 2008. — № 10. — С. 28–35.
5. Козуб, С. Н. Токсичность кадмия и методы воздействия его на окружающую среду [Текст] / С. Н. Козуб, А. А. Лавренко, П. А. Козуб, Г. И. Гринь и др. // Вісник НТУ «ХПІ». — 2008. — № 41. — С. 65–71.
6. Щербов, Д. П. Аналитическая химия кадмия [Текст] / Д. П. Щербов, М. А. Матвеев. — М.: Наука, 1973. — 256 с.
7. U. S. Geological Survey. Cadmium statistics [Text] // In: Historical statistics for mineral commodities in the United States. — U. S. Geological Survey, Reston, 2002. — 26 p.
8. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. COD 2000/0159 [Text] // Official Journal C 365 E. — 1998. — P. 195–197.
9. U. S. Geological Survey. Cadmium [Text] // In: Minerals Yearbook. — U. S. Geological Survey, Reston, 2002. — 198 p.
10. European Commission. Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of-life vehicles [Text]. — 2000. — P. 34–43.
11. European Commission. Commission welcomes agreement on Waste Electrical and Electronic Equipment and the Restriction of Hazardous Substances [Text]. — Brussels, 2002. — P. 2–12.
12. Hansen, E. Heavy Metals in Waste. European Commission [Text] / E. Hansen. — Brussels, 2002. — 156 p.
13. Guidance document on cadmium and its compounds [Text] / Baltic marine environment protection commission. — Helsinki: HELCOM, 2009. — 62 p.
14. Risk Reduction Monograph No. 5: Cadmium [Text] // OECD Environment Monograph Series No. 104. — Paris, 1994. — 195 p.
15. Scoullou, M. Heavy metals in waste [Text] / M. Scoullou, G. Vonkeman, I. Thornton. — Denmark, 2002. — 86 p.
16. Cadmium. Environmental Health Criteria 134 [Text] / World Health Organisation, International Programme on Chemical Safety (IPCS). — Geneva, Switzerland, 1992. — 250 p.
17. Cadmium-environmental aspects. Environmental Health Criteria 135 [Text] / World Health Organisation, International Programme on Chemical Safety (IPCS). — Geneva, Switzerland, 1992. — 290 p.
18. Guidelines for Drinking Water Quality [Text] / World health organization. — Geneva, 1993. — Vol. 1. — 25 p.
19. Хрусталева, Д. А. Аккумуляторы [Текст] / Д. А. Хрусталева. — М.: Изумруд, 2003. — 224 с.

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ВИБІР СИРОВИНИ ТЕХНОЛОГІЇ ВТОРИННОГО КАДМІЮ

Розглянуто основні джерела сировини та кінцеві продукти, які містять кадмій. Проаналізовано їх характеристики, можливості використання в техніці та у виробництві. Розглянуто тенденції ринку та законодавчого регулювання технології кадмію. Показано, що найбільш перспективним шляхом її розвитку є створення технологій вторинної переробки продуктів, які містять кадмій, а основною групою таких продуктів — вторинні джерела струму.

Ключові слова: кадмій, токсичність, виробництво кадмію, нікель-кадмієві елементи живлення, утилізація.

Козуб Светлана Николаевна, кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра медицинской и биоорганической химии, Харьковский национальный медицинский университет, Украина, e-mail: s.kozub@inbox.ru.

Козуб Светлана Миколаївна, кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра медичної та біоорганічної хімії, Харківський національний медичний університет, Україна.

Kozub Svetlana, Kharkov National Medical University, Ukraine, e-mail: s.kozub@inbox.ru

УДК 536.71

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.38138

Артеменко С. В.**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ РАВНОВЕСИЙ В ПОЛИАМОРФНЫХ СИСТЕМАХ**

В работе исследованы фазовые равновесия и критические линии полиаморфных систем на основе модифицированного уравнения состояния Ван-дер-Ваальса с несколькими критическими точками. Разработана адекватная модель фазовых равновесий в бинарных полиаморфных системах, включая равновесия жидкость — жидкость в однокомпонентных системах и оценку критических линий в бинарной смеси.

Ключевые слова: равновесие жидкость — жидкость, критические линии, мультикритические точки, метастабильные состояния.

1. Введение

Возникновение и развитие технологий, в которых используются высокие давления и метастабильные состояния, привлекли внимание к термодинамическому поведению нового класса материалов — полиаморфных

флюидных систем. Опубликованные в последнее десятилетие экспериментальные данные о наличии фазовых переходов жидкость — жидкость в однокомпонентных системах (углерод, фосфор, азот, кремний и др.) при высоких давлениях, вызвали значительный интерес к еще нерасшифрованным явлениям полиаморфизма.

Аномальное фазовое поведение жидкостей при высоких давлениях создает множество проблем при разработке перспективных технологий. Одна из наиболее загадочных аномалий — наличие фазовых переходов жидкость — жидкость в однокомпонентном веществе. Вода — один из ярких примеров молекулярных систем, где компьютерные эксперименты *in vitro* обнаруживают совершенно различные структуры, которые требуют своего реального подтверждения в натуральных экспериментах. Вплоть до настоящего времени полная фазовая диаграмма воды неизвестна и вопрос обнаружения второй и третьей критической точек остается предметом научных дискуссий. Первая попытка предсказать фазовое равновесие между двумя жидкостями (HDL) и (LDL), которые отличаются плотностями и локальными структурами была сделана Poole и др. [1] в 1992 на основе известного межмолекулярного потенциала воды. К тому времени уже было известно, что вода имеет несколько аморфных фаз [2]: высокой плотности (high density amorphous — HDA) и низкой плотности (low density amorphous — LDA), разделенных разрывным изменением плотности как при фазовом переходе первого рода. В 2001 году Loerting с сотрудниками [3] обнаружили еще одно аморфное состояние — фазу очень высокой плотности (very HDA — VHDA). Это свойство по ассоциации с полиморфизмом, способностью кристаллических веществ существовать при одном и том же химическом составе в состояниях с различной атомной кристаллической структурой, назвали полиаморфизмом, т. е. возможностью существования нескольких аморфных состояний [4].

Явление полиаморфизма и связанных с ним фазовых переходов между неупорядоченными состояниями усложняет классификацию фазового поведения смесей. Характерная черта уравнения состояния Ван-дер-Ваальса при высоких давлениях — отсутствие непрерывности критических линий для II, III и IV типов фазового поведения бинарных смесей. Для проверки гипотезы непрерывности критической линии при переходе из стабильной критической точки одного компонента в метастабильную критическую точку другого компонента исследован III тип фазового поведения. Этим обосновывается актуальность проведенного исследования.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Экспериментальные данные, опубликованные в последние годы, подтвердили наличие необычного поведения однокомпонентных жидкостей при высоких давлениях для углерода, фосфора, трифенил фосфита, кремния, азота, $Y_2O_3-Al_2O_3$, стекла [5]. Аномальное фазовое поведение жидкостей при высоких давлениях создает множество проблем при разработке новых технологий. Основной механизм необычного поведения — конкуренция энтропийных мер между существующими скрытыми структурами, которые присутствуют в жидкостях в метастабильных состояниях.

Подробное обсуждение различных *pro et contra* сценариев поведения воды опубликовано во всесторонних обзорах [5–7]. Первый шаг на пути к количественному описанию полиаморфной жидкости — это выбор модели, которая качественно описывает множество критических точек в широком интервале температур

и давлений. Было выполнено большое число работ, в которых сделаны попытки объяснить наличие многих критических точек в однокомпонентной жидкости (теория возмущений, полуэмпирические модели, решеточные модели, модели с двумя состояниями, теоретико-полевые модели, модели с несколькими параметрами порядка и параметрический кроссовер [7]). В работе автора подробно исследуется модифицированное уравнение Ван-дер-Ваальса (MVDW), предложенное в работе [4] и проведено уточнение этой модели за счет замены классического выражения для отталкивательного члена на наиболее точное уравнение состояния твердых сфер Liu [8], которое описывает данные компьютерных экспериментов как в области стабильных, так и метастабильных состояний.

3. Объект, цель и задачи исследования

Цель работы заключается в исследовании фазового поведения полиаморфных систем на основе модифицированных уравнений Ван-дер-Ваальса с несколькими критическими точками.

Задачей данного исследования является разработка адекватной модели фазовых равновесий в бинарных полиаморфных системах, включая равновесия жидкость — жидкость в однокомпонентных системах и оценку критических линий в бинарной смеси.

В качестве объекта исследований рассматривается модель бинарной смеси полиаморфных компонент с несколькими критическими точками.

4. Модель уравнения состояния с мультикритическими точками

Уравнения состояния в приближении среднего поля являются основным инструментом в описании термодинамического поведения веществ в широком диапазоне параметров состояния. Различные физические допущения и уточнения не изменяют топологическую структуру термодинамической поверхности, которая генерируется среднеполевыми моделями. Из этих соображений простейшая модель Ван-дер-Ваальса, демонстрирующая огромное многообразие термодинамического поведения для одно- и многокомпонентных жидкостей, выбрана здесь для описания качественной картины явлений в однокомпонентных веществах с несколькими критическими точками.

Фактор сжимаемости выражается как сумма сил отталкивания и притяжения:

$$Z = Z_{rep} + Z_{attr}. \quad (1)$$

Для сравнения простейшей аппроксимации уравнения состояния твердых сфер в классическом выражении Ван-дер-Ваальса:

$$Z_{rep} = \frac{1}{1-4\eta}, \quad (2)$$

с более точным широкодиапазонным уравнением твердых сфер в стабильной и метастабильной областях выбрано уравнение Liu [8]:

$$Z_{rep} = 1 + \sum_{i=1}^{12} a_{i+1} \eta^i + \frac{c_0 \eta}{1 - \alpha \eta} + c_1 \eta^{40} + c_2 \eta^{42} + c_3 \eta^{44}. \quad (3)$$

Здесь $Z = PV/NkT$ – фактор сжимаемости, P – давление, V – объем, T – температура, N – число частиц, k – постоянная Больцмана, $\eta = \pi \rho d^3 / 6$ – упаковочный коэффициент, $\rho = N/V$ – частичная плотность, d – диаметр твердой сферы. Коэффициенты a_i ($i = 1, 2, \dots, 12$) и c_i ($i = 0 \dots 3$) взяты из работы [9] и воспроизводят первые 12 вириальных коэффициентов при низких плотностях. Параметр, ограничивающий пределы метастабильной области $\alpha = 1/0,635584$. Обратная величина дает максимальное значение случайной плотной упаковки и определяет область применимости уравнения состояния. Для твердых сфер результат компьютерного моделирования дает достаточно близкое значение $\eta_0 = 0,6418$.

Силы притяжения описывали классическим выражением Ван-дер-Ваальса:

$$Z_{attr} = -\frac{a\eta}{NkT}, \quad (4)$$

где a – постоянная взаимодействия.

Классическая модель уравнения Ван-дер-Ваальса с постоянными параметрами d и a не может описать более чем один фазовый переход первого рода и одну критическую точку. Поэтому ключевым вопросом является поиск зависимости параметров модели Ван-дер-Ваальса от плотности и температуры, что дает возможность генерировать более одной критической точки в однокомпонентной жидкости. Здесь в качестве потенциала взаимодействия выбрана модель, представленная на рис. 1, где d_h – диаметр твердой сферы, d_s – диаметр мягкой сферы, который характеризует невозможность проникновения в сердцевину при низких температурах и низких плотностях.

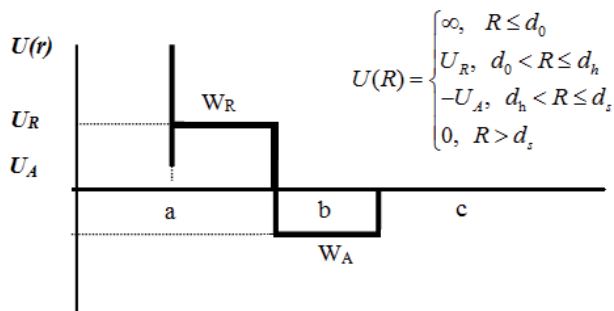


Рис. 1. Сферически симметричный shoulder потенциал

Характерная черта таких изотропных потенциалов – изменение кривизны внутри области отталкивания. Наиболее известные потенциалы взаимодействия такого типа, описывающие различные аномалии – пилообразные (sawtooth) и плечевые (shoulder). Потенциал обладает тремя безразмерными параметрами: d_h/d_0 , d_s/d_0 , и U_R/U_A , где $d_0 = 1$ и $U_A = 1$ были выбраны как единицы длины и энергии, соответственно. Различные аномалии

могут быть описаны на основе моделей сферически симметричных потенциалов взаимодействия, которые в области отталкивательной ветви имеют области с отрицательной кривизной (т. н. core softened потенциалы или потенциалы со смягченной сердцевиной). Данный потенциал генерирует три критических точки, две из которых расположены в метастабильной области, соответствующей твердому состоянию (рис. 2).

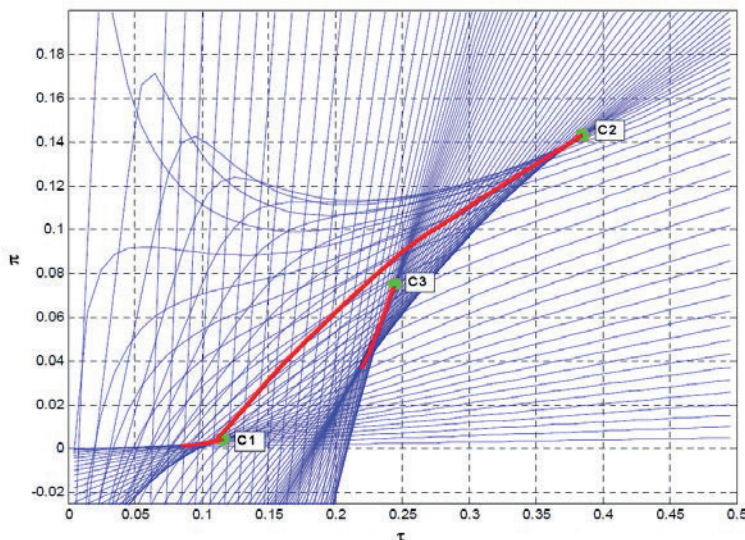


Рис. 2. Фазовая диаграмма для модифицированного уравнения Ван-дер-Ваальса с несколькими критическими точками

Здесь приняты следующие обозначения. Критические точки: C1 – газ + жидкость, C2 – жидкость низкой плотности (LDL) + жидкость высокой плотности (HDL) и C3 – жидкость высокой плотности (HDL) + жидкость очень высокой плотности (VHDL). Красные линии – кривые сосуществования. Координаты критических точек: $\pi_{C1} = 0,0064$, $\tau_{C1} = 0,1189$, $\gamma_{C1} = 0,0998$; $\pi_{C2} = 0,1423$, $\tau_{C2} = 0,3856$, $\gamma_{C2} = 0,33$; $\pi_{C3} = 0,07487$, $\tau_{C3} = 0,2398$, $\gamma_{C3} = 0,6856$. Параметры модели: $a = 6,962$, $b_h = 2,094$, $U_R/U_A = 3$, $b_s = 7,0686$.

Традиционный подход Ван-дер-Ваальса с модельными параметрами – константами b и a – не может предсказать более одного фазового перехода первого порядка и одной критической точки. Поэтому ключевой вопрос состоит в построении отображения потенциала взаимодействия, генерирующего более чем одну критическую точку на эффективный диаметр твердой сферы. Определение эффективного диаметра твердой сферы зависит от выбора потенциала взаимодействия между частицами, который должен предсказывать появление новых критических точек в однокомпонентной жидкости. Эволюция изохор в p - T фазовой диаграмме для «core softened» потенциала с тремя критическими точками в метастабильной области приведена на рис. 2. Экстраполяция экспериментально данных о поведении особых линий на термодинамической поверхности (экстремумов изобарной теплоемкости и изотермической сжимаемости) в область метастабильных состояний позволила предсказать следующие параметры второй критической точки воды ($T_{C2} = 203 \pm 5$ К, $P_{C2} = 0 \dots 25$ МПа).

Явление полиморфизма и связанные с ним фазовые переходы между неупорядоченными состояниями значительно расширяют классическую классификацию

Скотта и Ван-Кониенбурга [10], основанную на одножидкостной модели Ван-дер-Ваальса.

5. Критические линии и фазовые равновесия в бинарных смесях компонентов со многими критическими точками

Появление нескольких критических точек в однокомпонентной жидкости ведет к значительному усложнению фазового поведения полиаморфных бинарных смесей. В настоящее время классифицировано 26 особенностей и 56 различных сценариев эволюции p - T фазовых диаграмм. Увеличение числа критических точек для однокомпонентной системы можно интерпретировать как увеличение числа компонентов смеси.

Основная гипотеза, которую проверял автор данной статьи, заключается в том, что критическая линия не заканчивается на бесконечности или исчезает при высоких давлениях, а ведет себя непрерывным образом от критической точки одного компонента до одной из критических точек (метастабильной) второго компонента. Подтверждение этой гипотезы расширит Ван-дер-Ваальсовскую идею о непрерывности газообразного и жидкого состояний.

Для изучения возможности непрерывного перехода критической линии из стабильной критической точки первого компонента в метастабильную критическую точку второго компонента был выбран III тип фазового поведения. Критерий отбора термодинамических параметров для III типа был выбран на основе глобальной фазовой диаграммы для классического уравнения. Подтверждена непрерывность перехода из стабильной критической точки одного компонента в метастабильную точку второго. При проведении расчетов не было обнаружено дополнительных критических линий, которые были найдены в модели Truskett-Ashbaugh [11]. Анализ фазового поведения бинарных смесей с полиаморфным компонентом проводили на основе одножидкостного приближения. Параметры чистых компонентов для оценок выбраны такими, чтобы воспроизвести III тип фазового поведения:

$$\xi = \frac{b_{11} - b_{22}}{b_{11} + b_{22}} \approx 0,5,$$

$$\lambda = \frac{\frac{a_{22}}{b_{22}^2} - \frac{2a_{12}}{b_{11}b_{22}} + \frac{a_{11}}{b_{11}^2}}{\frac{a_{22}}{b_{22}^2} + \frac{a_{11}}{b_{11}^2}} \approx 0,5. \tag{5}$$

Для оценки попадания в III тип фазового поведения на глобальной фазовой диаграмме для модели Ван-дер-Ваальса бинарной смеси варьировали величину коэффициента k_{12} . Такая оценка не предсказывает положение III типа однозначно, поскольку MVDW и VDW модели имеют разные глобальные фазовые диаграммы, но сужает диапазон поиска хорошего начального приближения. В соответствии с классической работой Скотта и ван Кониенбурга [10]: для параметров модельного потенциала $a = 2,272$; $b_h = 2,27$, $U_R/U_A = 2$, $b_s = 10,29$ были получены следующие координаты критических точек: $\pi_{C1} = 0,832e-3$, $\tau_{C1} = 0,0327$, $\gamma_{C1} = 0,0678$; $\pi_{C2} = 0,1096$,

$\tau_{C2} = 0,2297$, $\gamma_{C2} = 0,2058$; $\pi_{C3} = 0,1799$, $\tau_{C3} = 0,1746$, $\gamma_{C3} = 0,6209$.

На рис. 3 сплошные линии — критические линии бинарных смесей; пунктирные линии — линии сосуществования чистых компонентов; $C_{n,m}$ — m^{th} критическая точка ($m \geq 1$) для n^{th} чистого компонента ($n = 1,2$); $m = 1$ идентифицирует критическую точку пар — жидкость; $m > 1$ соответствует критическим точкам жидкость — жидкость.

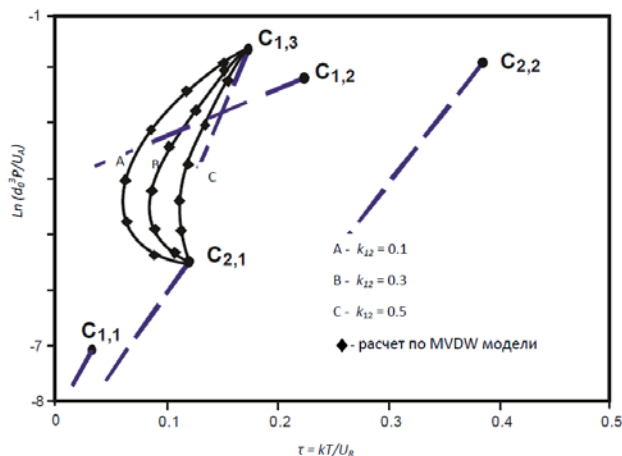


Рис. 3. Критические линии для бинарной смеси компонентов с полиаморфными флюидами

Для проверки гипотезы о непрерывности критических линий в бинарных смесях полиаморфных флюидов в качестве начального приближения использовали параметры вблизи критической точки второго компонента. Коэффициент бинарного взаимодействия k_{12} варьировали в интервале [0..0,5]. Результаты расчетов критических кривых представлены на рис. 3, где подтверждена непрерывность перехода из стабильной критической точки одного компонента в метастабильную точку второго. При проведении расчетов не было обнаружено дополнительных критических линий, которые были найдены в модели Truskett-Ashbaugh [11] при анализе фазового поведения бинарных смесей с полиаморфным компонентом. Одним из возможных объяснений этой несогласованности может служить противоположный наклон кривых жидкость — жидкость в исследуемых моделях.

6. Выводы

1. Особенности термодинамической поверхности полиаморфных флюидных систем с несколькими критическими точками для двухмасштабного потенциала межмолекулярного взаимодействия в модифицированной модели Ван-дер-Ваальса обнаруживают наличие двух метастабильных критических точек. Экстраполяция экспериментально обоснованных данных о поведении особых линий на термодинамической поверхности (экстремумов изобарной теплоемкости и изотермической сжимаемости) в область метастабильных состояний дает следующую оценку параметров второй ($T_{C2} = 203 \pm 5$ К, $P_{C2} = 0..25$ МПа) критической точки воды.

2. Для одножидкостной модели бинарной смеси с полиаморфными компонентами поведение критических линий, непрерывным образом соединяющих изолированную критическую точку одного компонента с изо-

лированной критической точкой другого компонента в метастабильной области, существенно расширяет ландшафт глобальной поверхности равновесия бинарной смеси как в области устойчивых, так и метастабильных состояний.

Литература

1. Poole, P. Effect of Hydrogen Bonds on the Thermodynamic Behavior of Liquid Water [Text] / P. Poole, F. Sciortino, T. Grande, H. Stanley, C. Angell // Physical Review Letters. — 1994. — Vol. 73, № 12. — P. 1632–1635. doi:10.1103/physrevlett.73.1632
2. Truskett, T. M. A single-bond approach to orientation-dependent interactions and its implications for liquid water [Text] / T. M. Truskett, P. G. Debenedetti, S. Sastry, S. Torquato // The Journal of Chemical Physics. — 1999. — Vol. 111, № 6. — P. 2647–2654. doi:10.1063/1.479540
3. Loerting, T. Amorphous ices: experiments and numerical simulations [Text] / T. Loerting, N. Giovambattista // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2006. — Vol. 18, № 50. — P. R919–R977. doi:10.1088/0953-8984/18/50/r01
4. Jeffery, C. A. A new analytic equation of state for liquid water [Text] / C. A. Jeffery, P. H. Austin // The Journal of Chemical Physics. — 1999. — Vol. 110, № 1. — P. 484–489. doi:10.1063/1.477977
5. Skibinsky, A. Liquid – liquid phase transitions for soft-core attractive potentials [Text] / A. Skibinsky, S. V. Buldyrev, G. Franzese, G. Malescio, H. Stanley // Physical Review E. — 2004. — Vol. 69, № 6. — P. 061206–061212. doi:10.1103/physreve.69.061206
6. Mishima, O. The relationship between liquid, supercooled and glassy water [Text] / O. Mishima, H. Stanley // Nature. — 1998. — Vol. 396, № 6709. — P. 329–335. doi:10.1038/24540
7. Angell, C. A. Insights into Phases of Liquid Water from Study of Its Unusual Glass-Forming Properties [Text] / C. A. Angell // Science. — 2008. — Vol. 319, № 5863. — P. 582–587. doi:10.1126/science.1131939
8. Liu, H. A very accurate hard sphere equation of state over the entire stable and metastable region [Text] / Hongqin Liu // Statistical Mechanics. — 2006. — Available at: \www/URL: http://arxiv.org/abs/cond-mat/0605392
9. Debenedetti, P. G. Supercooled and glassy water [Text] / P. G. Debenedetti // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2003. — Vol. 15, № 45. — P. R1669–R1726. doi:10.1088/0953-8984/15/45/r01
10. Konynenburg, P. H. V. Critical Lines and Phase Equilibria in Binary Van Der Waals Mixtures [Text] / P. H. V. Konynenburg, R. L. Scott // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 1980. — Vol. 298, № 1442. — P. 495–540. doi:10.1098/rsta.1980.0266
11. Ashbaugh, H. S. A simple molecular thermodynamic theory of hydrophobic hydration [Text] / H. S. Ashbaugh, T. M. Truskett, P. G. Debenedetti // The Journal of Chemical Physics. — 2002. — Vol. 116, № 7. — P. 2907–2921. doi:10.1063/1.1436479

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВИХ РІВНОВАГ У ПОЛІАМОРФНИХ СИСТЕМАХ

В роботі досліджено фазові рівноваги та критичні лінії поліаморфних систем на основі модифікованого рівняння стану Ван-дер-Ваальса з багатьма критичними точками. Розроблена адекватна модель фазових рівноваг в бінарних поліаморфних системах, що включає рівноваги рідина – рідина, в однокомпонентних системах та оцінку критичних ліній в бінарній суміші.

Ключові слова: рівноваги рідина – рідина, критичні лінії, мультикритичні точки, метастабільні стани.

Артемченко Сергей Викторович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор, кафедра информационных систем и сетей, Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, e-mail: sergey.artemenko@gmail.com.

Артемченко Сергій Вікторович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор, кафедра інформаційних систем і мереж, Одеська національна академія харчових технологій, Україна.

Artemenko Sergiy, Odessa National Academy of Food Technology, Ukraine, e-mail: sergey.artemenko@gmail.com

УДК 621.78:641

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.38141

Шаповал С. Л.

ДАТЧИК ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Сформульовано основні вимоги до датчика для дослідження теплофізичних характеристик окремих шарів харчових продуктів. Проведено аналіз особливостей застосування розповсюджених температурних датчиків у харчових продуктах. Наведена схема температурного датчика на основі напівпровідникового діоду в режимі роботи за постійного струму. Описано особливості роботи датчиків з відкритими контактами у кислому та лужному середовищах. Доведено лінійність датчика у діапазоні температур 55..95 °С.

Ключові слова: теплофізичні властивості, температурний датчик, калібрування, лінійність показників, градувальний графік.

1. Вступ

Харчові продукти часто являють собою складну систему із різних шарів, які можуть мати різний агрегатний

стан, кислотність, коефіцієнти температурного розширення, різну температуру газоутворення та денатурації білків. Теплофізичні властивості регламентують час та режими термічної обробки, швидкість охолодження,