

**ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ  
РАСТВОРОВ**

УДК 541.8

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ  
АЛКАНЫ И ЦИКЛОДОДЕКАН**

© 2020 г. А. А. Шамитов<sup>а,\*</sup>, И. К. Гаркушин<sup>а</sup>, А. В. Колядо<sup>а</sup><sup>а</sup> Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

\*e-mail: Sansher@mail.ru

Поступила в редакцию 06.04.2019 г.

После доработки 04.06.2019 г.

Принята к публикации 09.07.2019 г.

Трехкомпонентные системы с участием циклододекана и *n*-алканов исследованы методом дифференциального термического анализа (ДТА) на установке дифференциального сканирующего микрокалориметра (ДСК). Сделан вывод, что экспериментально исследованные 13 трехкомпонентных систем ряда  $n\text{-C}_n\text{H}_{2n+2}\text{-C}_{12}\text{H}_{24}\text{-}n\text{-C}_m\text{H}_{2m+2}$  ( $n, m = 2k, k = 5, \dots, 12$ ), характеризуются образованием тройных эвтектик, большинство систем удовлетворительно согласуются с ранее предложенными и разработанными методами по прогнозированию систем.

*Ключевые слова:* *n*-алкан, циклододекан, теплоноситель, трехкомпонентная система

DOI: 10.31857/S0044453720030279

В настоящее время актуальна разработка новых алгоритмов и методов моделирования фазовой диаграммы, а также ее отдельных элементов, отвечающих моновариантным и невариантным равновесиям в системе [1–11]. Современный подход к разработке новых составов для тепловых аккумуляторов невозможно представить без исследования фазовых равновесий в многокомпонентной системе. Для этого необходимо подобрать теплоаккумулирующий материал, обладающий работоспособностью в определенном узком диапазоне температур. Для тепловых аккумуляторов в качестве рабочего тела могут служить сплавы эвтектического состава в трехкомпонентных системах на основе углеводородов циклического строения и алканов нормального строения. Другое направление промышленного использования инвариантных составов на основе углеводородов (в том числе и циклододекана), состоящих из двух-, трех- и более компонентов, – создание теплоносителей с низким давлением насыщенных паров компонентов и температурой вспышки в закрытом тигле более 61°C [12–16].

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования для поиска новых теплоносителей выбраны системы ряда  $n\text{-C}_n\text{H}_{2n+2}\text{-C}_{12}\text{H}_{24}\text{-}n\text{-C}_m\text{H}_{2m+2}$  ( $n, m = 2k, k = 5, \dots, 12$ ). Предварительный расчет фазовых диаграмм двух- и трехкомпонентных систем осуществлялся с использованием уравнения Вильсона, в кото-

ром с целью уменьшения отклонения расчетных данных от эксперимента дополнительно в систему уравнений были введены коэффициенты активности компонентов. Основная идея ее состоит в том, что вследствие различия в межмолекулярных взаимодействиях локальный состав вблизи конкретной молекулы в растворе будет отличаться от состава жидкости. Для бинарной пары два параметра ( $\Lambda_{ij}, \Lambda_{ji}$ ) связаны со степенью, в которой каждая молекула влияет на состав своего локального окружения [17]. Зависимость коэффициентов активности определяется в системах по уравнениям:

$$\ln \gamma_i = \frac{\Delta_m H_i}{R} \left( \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_e} \right) - \ln x_i, \quad (1)$$

$$\ln \gamma_i = -\ln(x_i + \Lambda_{ij}x_j) + x_j \left( \frac{\Lambda_{ij}}{x_i + \Lambda_{ij}x_j} - \frac{\Lambda_{ji}}{x_j + \Lambda_{ji}x_i} \right), \quad (2)$$

где  $T_e$  – температура плавления эвтектики в трехкомпонентной системе, К;  $T_i$  – температура плавления компонента в системе, К;  $x_i$  – мольная доля компонента *i* в сплаве эвтектического состава двухкомпонентной системы;  $\Delta_m H_i$  – энтальпия плавления компонента *i*, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8.314 Дж/(моль К).

Параметры взаимодействия  $\Lambda_{12}, \Lambda_{21}$  (табл. 1) определяли по данным о взаимной растворимо-

**Таблица 1.** Расчетные значения параметров взаимодействия  $\Lambda_{12}$ ,  $\Lambda_{21}$  (первого со вторым и второго с первым) для компонентов 1 и 2 эвтектик двойных систем

1	2	$\Lambda_{12}$	$\Lambda_{21}$	1	2	$\Lambda_{12}$	$\Lambda_{21}$
<i>n</i> -C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	<i>n</i> -C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	3.4475	0.0027	<i>n</i> -C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	<i>n</i> -C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>	3.4475	0.0027
<i>n</i> -C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	<i>n</i> -C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>	3.4475	0.0027	<i>n</i> -C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	<i>n</i> -C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>	3.4475	0.0027
<i>n</i> -C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	<i>n</i> -C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	3.4475	0.0027	<i>n</i> -C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>	0.3522	0.3991
<i>n</i> -C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	<i>n</i> -C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	3.4475	0.0027	<i>n</i> -C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>	0.8311	0.2455
<i>n</i> -C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	<i>n</i> -C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>	3.4475	0.0027	<i>n</i> -C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>	1.1065	0.2087
<i>n</i> -C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	<i>n</i> -C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	3.4475	0.0027	<i>n</i> -C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>	1.4731	0.1775
<i>n</i> -C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	<i>n</i> -C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>	3.4475	0.0027				
<i>n</i> -C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	<i>n</i> -C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>	3.4475	0.0027				

сти компонентов путем решения системы, составленной из системы уравнений (1)–(2):

$$\begin{cases} \frac{\Delta_m H_1}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_e} \right) - \ln x_1 = -\ln(x_1 + \Lambda_{12}x_2) + \\ + x_2 \left( \frac{\Lambda_{12}}{x_1 + \Lambda_{12}x_2} - \frac{\Lambda_{21}}{x_2 + \Lambda_{21}x_1} \right), \\ \frac{\Delta_m H_2}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_e} \right) - \ln x_2 = -\ln(x_2 + \Lambda_{21}x_1) + \\ + x_1 \left( \frac{\Lambda_{12}}{x_1 + \Lambda_{12}x_2} - \frac{\Lambda_{21}}{x_2 + \Lambda_{21}x_1} \right). \end{cases} \quad (3)$$

Как видно из табл. 1, в системах из двух алканов, коэффициенты одинаковы. Для систем *n*-алкан – циклододекан значение  $\Lambda_{12}$  *n*-алкана увеличивается, а величина  $\Lambda_{21}$  циклододекана снижается.

Для трехкомпонентной системы расчетные уравнения примут вид:

$$\begin{aligned} \ln \gamma_i = 1 - \ln[x_i + x_j \Lambda_{ij} + x_k \Lambda_{ik}] - \\ - \frac{x_i}{x_i + x_j \Lambda_{ij} + x_k \Lambda_{ik}} - \\ - \frac{x_j \Lambda_{ji}}{x_i \Lambda_{ji} + x_j + x_k \Lambda_{jk}} - \frac{x_k \Lambda_{ki}}{x_i \Lambda_{ki} + x_j \Lambda_{kj} + x_k}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$T = \left[ \frac{1}{T_i} - \frac{R}{\Delta_m H_i} (\ln x_i + \ln \gamma_i) \right]^{-1}. \quad (5)$$

Состав эвтектики в трехкомпонентной системе определяется путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} T = \left[ \frac{1}{T_i} - \frac{R}{\Delta_m H_i} (\ln x_i + \ln \gamma_i) \right]^{-1}, \\ T = \left[ \frac{1}{T_j} - \frac{R}{\Delta_m H_j} (\ln x_j + \ln \gamma_j) \right]^{-1}, \\ T = \left[ \frac{1}{T_k} - \frac{R}{\Delta_m H_k} (\ln x_k + \ln \gamma_k) \right]^{-1}, \\ x_i + x_j + x_k = 1. \end{cases} \quad (6)$$

С использованием приведенных выше формул были рассчитаны фазовые диаграммы по уравнению Вильсона для двух- и трехкомпонентных систем на основе *n*-алканов с четным числом атомов углерода в основной цепи с общей формулой *n*-C<sub>*n*</sub>H<sub>2*n*+2</sub>, где *n* = 10, ..., 24 и циклододеканом.

Данные по температурам и энтальпиям плавления индивидуальных компонентов взяты из литературы [18]. Исходя из элементов ограничения – эвтектических двухкомпонентных систем, можно заключить, что системы ряда *n*-C<sub>*n*</sub>H<sub>2*n*+2</sub>–C<sub>12</sub>H<sub>24</sub>–*n*-C<sub>*m*</sub>H<sub>2*m*+2</sub> (*n*, *m* = 2*k*, *k* = 5, ..., 12), относятся к системам эвтектического типа. Расчет по уравнению Вильсона позволил определить температуры плавления и составы тройных эвтектик *E*, которые приведены в табл. 2.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные исследования фазовых превращений в системах ряда *n*-C<sub>*n*</sub>H<sub>2*n*+2</sub>–C<sub>12</sub>H<sub>24</sub>–*n*-C<sub>*m*</sub>H<sub>2*m*+2</sub> (*n*, *m* = 2*k*, *k* = 5, ..., 12) [19] проводили на установке дифференциального термического анализа. Основным инструментальным методом исследования служил дифференциальный сканирующий микрокалориметр (ДСК-500С), на котором снимали кривые нагревания и охлаждения образцов [19]. Съёмку кривых нагрева (охлаждения) проводили 3 раза. Скорость нагрева 4 К/мин обеспечивала четкое разделение пиков для образцов с массой навески 15–20 мг. Хладагент – твердый CO<sub>2</sub>. Для исследований использовали вещества заводского изготовления квалификаций “ч”, “х.ч.” и “ч.д.а.” Составы готовили взвешиванием на аналитических весах CAS марки CAUW 120D специального класса точности по ГОСТ Р 53228-2008, масса приготовленных смесей составляла от 1.0 до 8.0 г, точность взвешивания ±0.0001 г. Составы всех смесей на диаграммах, исследованных экспериментально, выражены в мас. %, температура – в °С.

**Таблица 2.** Характеристики сплава эвтектического состава, рассчитанные с использованием уравнения Вильсона

Система	Содержание компонентов, мас. %			$T_{пл}$ , К	Источник
	1	2	3		
$n-C_{10}H_{22}-C_{12}H_{24}-n-C_{16}H_{34}$	84.2	11.6	4.2	241.5	[23]
$n-C_{10}H_{22}-C_{12}H_{24}-n-C_{18}H_{38}$	86.7	13.1	0.2	241.5	[25]
$n-C_{10}H_{22}-C_{12}H_{24}-n-C_{20}H_{42}$	87.0	12.9	0.1	241.6	[21]
$n-C_{10}H_{22}-C_{12}H_{24}-n-C_{22}H_{46}$	86.8	13.1	0.1	241.6	[22]
$n-C_{12}H_{26}-C_{12}H_{24}-n-C_{16}H_{34}$	69.9	19.1	11.0	259.8	[24]
$n-C_{12}H_{26}-C_{12}H_{24}-n-C_{18}H_{38}$	82.0	16.8	1.2	261.0	[29]
$n-C_{12}H_{26}-C_{12}H_{24}-n-C_{20}H_{42}$	79.6	17.4	3.0	261.0	*
$n-C_{12}H_{26}-C_{12}H_{24}-n-C_{22}H_{46}$	75.5	18.5	6.0	261.0	[30]
$n-C_{14}H_{30}-C_{12}H_{24}-n-C_{20}H_{42}$	65.4	24.2	10.4	274.0	[28]
$n-C_{14}H_{30}-C_{12}H_{24}-n-C_{22}H_{46}$	61.6	24.4	14.0	274.4	[27]
$n-C_{14}H_{30}-C_{12}H_{24}-n-C_{24}H_{50}$	75.9	21.9	2.2	276.1	[26]
$n-C_{16}H_{34}-C_{12}H_{24}-n-C_{22}H_{46}$	46.5	32.8	20.7	283.9	*
$n-C_{16}H_{34}-C_{12}H_{24}-n-C_{24}H_{50}$	61.9	32.4	5.6	287.1	*

Примечание. Нумерация компонентов системы соответствует порядку, в котором указаны компоненты в графе “Система”, \* наши данные.

С учетом координат эвтектик двойных систем, системы ряда  $n-C_nH_{2n+2}-C_{12}H_{24}-n-C_mH_{2m+2}$  ( $n, m = 2k, k = 5, \dots, 12$ ), относятся к системам эвтектического типа.

Системы исследовались проекционно-термографическим методом (ПТГМ) [20]. Согласно правилам ПТГМ для исследования каждой системы был выбран политермический разрез  $A$  [%  $n-C_nH_{2n+2}$  – %  $C_{12}H_{24}$ ] –  $B$  [%  $n-C_mH_{2m+2}$  – %  $C_{12}H_{24}$ ], расположенный в поле кристаллизации циклододекана [21, 22]. Из  $T-x$ -диаграммы политермического разреза  $AB$  определено соотношение алканов в эвтектике, точка  $\bar{E}$  на разрезе  $AB$  и температура плавления тройной эвтектики  $E$  [23]. Исследование политермического разреза  $C_{12}H_{24} \rightarrow \bar{E} \rightarrow E$ , исходящего из циклододекана и проходящего через найденное направление  $\bar{E}$  на эвтектику  $E$ , позволило определить ее состав. Данные по всем системам представлены в табл. 3. На фазовом комплексе систем  $n-C_nH_{2n+2}-C_{12}H_{24}-n-C_mH_{2m+2}$  ( $n, m = 2k, k = 5, \dots, 12$ ), расположены три поля кристаллизации:  $n-C_nH_{2n+2}$ ,  $n-C_mH_{2m+2}$  и циклододекана [24, 25].

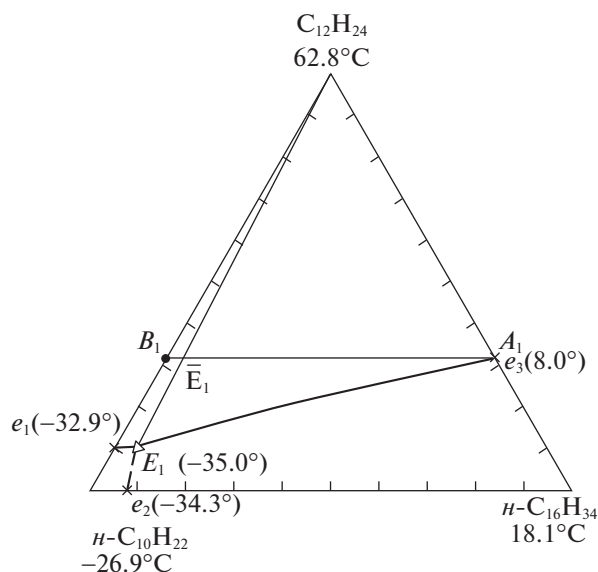
На рис. 1 и 2 представлены проекции некоторых фазовых комплексов системы  $n-C_nH_{2n+2}-C_{12}H_{24}-n-C_mH_{2m+2}$  ( $n, m = 2k, k = 5, \dots, 12$ ) с данными по элементам ограничения.

Полученные данные в процессе эксперимента по температурам плавления и составам двойных и тройных эвтектик позволяют определить коэф-

фициенты активности компонентов в эвтектиках по уравнению:

$$\ln \gamma_i = \frac{\Delta_m H_i}{R} \left( \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_e} \right) - \ln x_i, \quad (7)$$

где  $T_e$  – температура плавления двойной (тройной) эвтектики, К;  $T_i$  – температура плавления компонента в системе, К;  $x_i$  – мольная доля компонента  $i$  в сплаве двойного (тройного) эвтекти-



**Рис. 1.** Фазовый комплекс системы  $n-C_{10}H_{22}-n-C_{16}H_{34}-C_{12}H_{24}$

**Таблица 3.** Температуры плавления ( $T_e$ ) и составы эвтектических сплавов ( $x_i$ , мас. %), выявленных экспериментальным методом

Система	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$T_e$ , К	Источник
$n-C_{10}H_{22}-C_{12}H_{24}-n-C_{16}H_{34}$	85.0	11.0	4.0	238.2	[23]
$n-C_{10}H_{22}-C_{12}H_{24}-n-C_{18}H_{38}$	84.5	10.0	5.5	238.2	[25]
$n-C_{10}H_{22}-C_{12}H_{24}-n-C_{20}H_{42}$	89.2	8.0	2.8	239.4	[21]
$n-C_{10}H_{22}-C_{12}H_{24}-n-C_{22}H_{46}$	86.5	10.0	3.5	239.7	[22]
$n-C_{12}H_{26}-C_{12}H_{24}-n-C_{16}H_{34}$	73.0	18.0	9.0	255.5	[24]
$n-C_{12}H_{26}-C_{12}H_{24}-n-C_{18}H_{38}$	80.0	19.0	1.0	256.6	[29]
$n-C_{12}H_{26}-C_{12}H_{24}-n-C_{20}H_{42}$	83.0	14.0	3.0	256.8	*
$n-C_{12}H_{26}-C_{12}H_{24}-n-C_{22}H_{46}$	82.0	15.0	3.0	257.0	[30]
$n-C_{14}H_{30}-C_{12}H_{24}-n-C_{20}H_{42}$	68.0	29.7	2.3	270.3	[28]
$n-C_{14}H_{30}-C_{12}H_{24}-n-C_{22}H_{46}$	65.0	33.8	1.2	270.9	[27]
$n-C_{14}H_{30}-C_{12}H_{24}-n-C_{24}H_{50}$	65.0	33.0	2.0	274.0	[26]
$n-C_{16}H_{34}-C_{12}H_{24}-n-C_{22}H_{46}$	65.0	28.5	6.5	280.5	*
$n-C_{16}H_{34}-C_{12}H_{24}-n-C_{24}H_{50}$	62.0	34.0	4.0	280.6	*

Примечание. Нумерация компонентов системы соответствует порядку, в котором указаны компоненты в графе "Система", \* наши данные.

**Таблица 4.** Данные по коэффициентам активности компонентов 1–3 в сплавах эвтектических составов

1	2	3	$T_e$ , К	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$
$n-C_{14}H_{30}$	$C_{12}H_{24}$	—	275.7	0.06	1.19	
$n-C_{20}H_{42}$	$C_{12}H_{24}$	—	303.2	0.001	1.27	
$n-C_{22}H_{46}$	$C_{12}H_{24}$	—	305.1	0.004	1.11	
$n-C_{24}H_{50}$	$C_{12}H_{24}$	—	310.2	0.00003	1.18	
$n-C_{10}H_{22}$	$n-C_{20}H_{42}$	$C_{12}H_{24}$	239.4	0.86	0.01	3.62
$n-C_{10}H_{22}$	$n-C_{22}H_{46}$	$C_{12}H_{24}$	239.7	0.90	0.03	2.94
$n-C_{12}H_{26}$	$n-C_{18}H_{38}$	$C_{12}H_{24}$	256.6	0.21	0.10	1.75
$n-C_{12}H_{26}$	$n-C_{20}H_{42}$	$C_{12}H_{24}$	256.8	0.21	0.02	2.42
$n-C_{12}H_{26}$	$n-C_{22}H_{46}$	$C_{12}H_{24}$	257.0	0.21	0.04	2.27
$n-C_{14}H_{30}$	$n-C_{20}H_{42}$	$C_{12}H_{24}$	270.3	0.05	0.02	1.26
$n-C_{14}H_{30}$	$n-C_{22}H_{46}$	$C_{12}H_{24}$	270.9	0.06	0.11	1.10
$n-C_{14}H_{30}$	$n-C_{24}H_{50}$	$C_{12}H_{24}$	274.0	0.06	0.0004	1.13
$n-C_{16}H_{34}$	$n-C_{22}H_{46}$	$C_{12}H_{24}$	280.5	0.01	0.02	1.48
$n-C_{16}H_{34}$	$n-C_{24}H_{50}$	$C_{12}H_{24}$	280.6	0.01	0.0002	1.21

ческого состава;  $\Delta_m H_i$  — энтальпия плавления компонента  $i$ , Дж/моль.

Результаты расчета по коэффициентам активности трехкомпонентной системы приведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, коэффициенты активности отличается от 1. Следовательно, системы не являются идеальными.

Таким образом, системы  $n-C_n H_{2n+2}-C_{12}H_{24}-n-C_m H_{2m+2}$  ( $n, m = 2k, k = 5, \dots, 12$ ) относятся к системам эвтектического типа. Сплавы эвтектических составов могут быть использованы в качестве рабочего тела низкотемпературных аккумуляторов тепла или в качестве среднетемпературных теплоносителей в гелиоэнергетических установках с температурой эксплуатации от 5 до 240°C. Все рас-

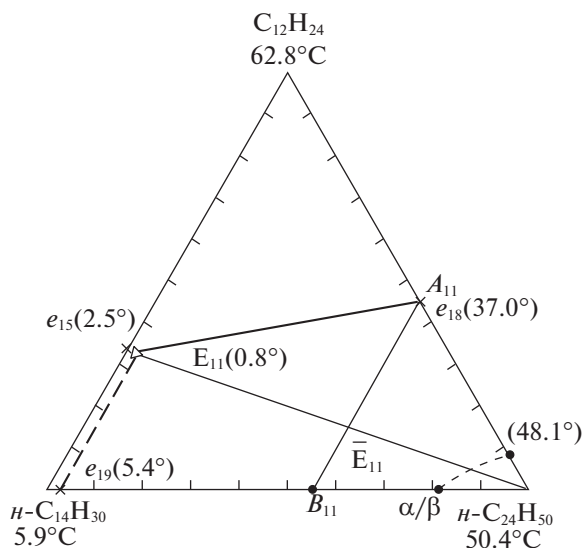


Рис. 2. Фазовый комплекс системы  $n\text{-C}_{14}\text{H}_{30}\text{-}n\text{-C}_{24}\text{H}_{50}\text{-C}_{12}\text{H}_{24}$ .

смаатриваемые системы имеют отклонение от идеальности, поэтому необходимо учитывать коэффициент активности компонентов системы при расчете параметров эвтектики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ten Y.S., Rangaiah G.P. // Chem. Eng. Res. and Design. 2002. V. 80. Part A. P. 745.
2. Goff M.J., Suppes G.J., Dasari M.A. // Fluid Phase Equilib. 2005. V. 238. P. 149.
3. Allal F., Dahmani A. // Ibid. 2001. V. 190. P. 33.
4. Abildskov J., Gani R., Rasmussen P., O'Connell J.P. // Ibid. 2001. V. 181. P. 163.
5. Kuramochi H., Maeda K., Kato S. et al. // Fuel. 2009. V. 88. P. 1472.
6. Domanska U., Gloskowska M. // Fluid Phase Equilib. 2004. V. 216. P. 135.
7. Santiago R.S., Aznar M. // Ibid. 2011. V. 303. P. 111.
8. Espada J.J., Coto B., Pena J.L. // Ibid. 2007. V. 259. P. 201.
9. Nebig S., Gmehling J. // Ibid. 2010. V. 294. P. 206.
10. Гаркушин И.К., Агафонов И.А., Копнина А.Ю., Калинина И.П. Фазовые равновесия с участием  $n$ -алканов, циклоалканов и аренов. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 127с. ISBN 5-7691-1697-8.

11. Копнина А.Ю., Агафонов И.А., Гаркушин И.К. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2001. Т. 44. Вып. 5. С. 84.
12. Котельников Е.Н., Филатов С.К. Кристаллохимия парафинов // СПб.: Изд-во "Журнал Нева". 2002. 352 с.
13. Гаркушин И.К., Люстрицкая Д.В., Мощенский Ю.В. Теплоаккумулирующий состав / Пат. РФ 2357995. 2009.
14. Данилин В.Н., Железняк А.В., Марцинковский А.В., Долесов А.Г., Доценко С.П. Фазопереходный теплоаккумулирующий состав / Пат. РФ 2282652. 2006.
15. Гаркушин И.К., Калинина И.П., Копнина А.Ю. Теплоаккумулирующее вещество / Пат. РФ 2280668. 2006.
16. Гаркушин И.К., Калинина И.П., Копнина А.Ю. Теплоноситель / Пат. РФ 2243249. 2004.
17. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Л.: Химия, 1971. 704 с.
18. Татевский В.М. Физико-химические свойства углеводородов. М.: Гостоптехиздат, 1960. 412 с.
19. Мощенский Ю.В. Микрокалориметр ДСК: Метод. указ. к лаб. работе. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2004. 19 с.
20. Космынин А.С., Трунин А.С. // Тр. Самарской научной школы по физ.-хим. анализу многокомпонентных систем. Т. 9. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2006. 183 с.
21. Гаркушин И.К., Колядо А.В., Шамитов А.А. // Журн. физ. химии. 2016. Т. 90. № 5. С. 815.
22. Шамитов А.А., Гаркушин И.К., Колядо А.В. // Там же. 2016. Т. 90. № 7. С. 1124.
23. Шамитов А.А., Гаркушин И.К., Колядо А.В., Петров Е.П. // Там же. 2018. Т. 92. № 2. С. 282.
24. Шамитов А.А., Гаркушин И.К., Колядо А.В., Петров Е.П. // Там же. 2018. Т. 92. № 3. С. 370.
25. Шамитов А.А., Гаркушин И.К., Колядо А.В., Петров Е.П. // Там же. 2018. Т. 92. № 9. С. 1421.
26. Шамитов А.А., Колядо А.В., Гаркушин И.К. // Там же. 2015. Т. 89. № 10. С. 1598.
27. Шамитов А.А., Колядо А.В., Гаркушин И.К., Журавлев И.А. // Башкирский хим. журн. 2015. Т. 22. № 4. С. 3.
28. Шамитов А.А., Колядо А.В., Гаркушин И.К., Журавлев И.А. Использование метода // Вестн. СамГТУ. Сер. Техн. науки. 2015. № 1 (45). С. 189.
29. Шамитов А.А., Колядо А.В., Гаркушин И.К. // Теоретическая и экспериментальная химия жидкофазных систем. Крестовские чтения. 2015. С. 39.
30. Шамитов А.А., Колядо А.В., Гаркушин И.К. // Матер. IV Межд. конф. "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы". Махачкала, 2015. Т. 2. С. 342.