

Л. КУДРЯВЦЕВА, ХЕЛЛЕ ВИИТ, О. ЭЙЗЕН

## РАВНОВЕСИЕ ЖИДКОСТЬ—ПАР В БИНАРНЫХ СИСТЕМАХ, СОДЕРЖАЩИХ ОЛЕФИНЫ

### 1. РАВНОВЕСИЕ ЖИДКОСТЬ—ПАР В БИНАРНЫХ СИСТЕМАХ, ОБРАЗОВАННЫХ *n*-ГЕКСЕНОМ-1 С МЕТАНОЛОМ, ЭТАНОЛОМ, ИЗОПРОПАНОЛОМ И ПРОПАНОЛОМ

Для выделения олефинов из смеси с другими углеводородами может быть использован метод ректификации в присутствии так наз. разделяющего агента, правильный выбор которого производится на основе данных о фазовых равновесиях в бинарных системах и об их азеотропных свойствах. Изучению фазовых равновесий в системах, содержащих олефины, посвящен в последнее время ряд работ [1-7]. В настоящем сообщении приводятся результаты исследования изотермического равновесия между жидкостью и паром в бинарных системах, образованных гексеном-1 с метиловым, этиловым, изопропиловым и пропиловым спиртами. Наряду с этим были исследованы бинарные системы, образованные *n*-гептеном-1 и *n*-октеном-1 с некоторыми кислородными соединениями, данные о которых будут опубликованы позднее. Целью этих работ было получить результаты, которые позволили бы обсудить круг вопросов термодинамики тройных систем, содержащих олефины.

### Экспериментальная часть

Использованные в работе реактивы имели следующие характеристики:

	$n_D^{20}$	$d_4^{20}$	Т. кип., °C
гексен-1	1,3879	0,6731	63,5
метанол	1,3285	0,7928	64,7
этанол	1,3612	0,7894	78,3
изопропанол	1,3775	0,7851	82,5
пропанол	1,3853	0,8035	97,5

Чистота веществ проверялась также хроматографически на приборе УХ-1 (чувствительность самописца 1 ма, газ-носитель — гелий, скорость потока 50 мл/мин), причем примеси не были обнаружены.

В качестве исходных веществ применялись гексен-1, метанол, этанол, изопропанол и пропанол. Гексен-1 марки «ч» дважды перегонялся на ректификационной колонке эффективностью 25 теоретических тарелок, причем отобранная фракция имела указанные выше характеристики. Помимо того, часть гексена-1 была синтезирована методом гидрирования гексина-1 [8]. Последний был получен алкилированием натриевого производного ацетилена бромбутаном в жидком аммиаке [9].

Продукт синтеза очищался ректификацией [10]. Метанол «технический» предварительно очищался от ацетона обработкой гипойодидом натрия [11], после чего сушился над прокаленным поташом и перегонялся. Этанол обезвоживался методом азеотропной ректификации [12]. Изопропиловый и пропиловый спирты марки «чда» дважды перегонялись на ректификационной колонке.

Для изучения фазового равновесия применялся микроприбор, сконструированный Вихтерле и Хала [13], общий объем исследуемой жидкости в котором составляет около 2 мл. Методика исследования равновесия и определения составов сосуществующих фаз и азеотропов приведена в [14, 15]. Смещение составов азеотропов и изменение их температур кипения при изменении давления изучались в вакуумной колонке [15]. Температура определялась выверенным ртутным термометром с точностью  $\pm 0,2^\circ$ , давление — с точностью 2 мм рт. ст. Для газохроматографического анализа систем, образованных гексенom с метанолом\* и этанолом, применялась колонка длиной 3 м с наполнителем 20% полиэтиленгликоля на хромосорбе W при температуре  $110^\circ$ . Анализ смесей гексен-1—изопропанол проводился при той же температуре на пятиметровой колонке с наполнителем 20% твина 80 на хромосорбе P. Смеси гексен-1—пропанол анализировали при  $80^\circ$  на двухметровой колонке с наполнителем 20% твина 80 на хромосорбе W.

### Экспериментальные данные

Основные результаты исследования приводятся в табл. 1 и 2. Для термодинамической корреляции полученных данных применялось уравнение Редлиха—Кистера IV порядка [16], константы для которого определялись из экспериментальных данных методом наименьшего квадрата с использованием постепенного приближения [17] (мы ограничились вторым приближением). На рис. 1—4 корреляционные кривые сравниваются с результатами расчета по формуле  $\lg \gamma_1/\gamma_2 = \lg a_{12} \cdot p_2^0/p_1^0$  при температуре  $55^\circ$ .

Значения коэффициентов активности компонентов вычислялись с помощью уравнений

$$\begin{aligned} \lg \gamma_1 &= x_2^2 [b - c(1 - 4x_1) + d(1 - 8x_1 + 12x_1^2)], \\ \lg \gamma_2 &= x_1^2 [b + c(1 - 4x_2) + d(1 - 8x_2 + 12x_2^2)]. \end{aligned} \quad (1)$$

Соответствие рассчитанных по уравнениям (1) и полученных из соотношений

$$\gamma_i = \frac{P \cdot x_i^{(2)}}{p_i^0 \cdot x_i^{(1)}}, \quad (2)$$

$$\gamma_i = \gamma_i \exp \frac{(P - p_i^0)(B_i - \bar{V}_i)}{RT} \quad (3)$$

значений коэффициентов активности проверяли по данным о равновесии жидкость—пар при температуре  $55^\circ$  в системе гексан—этанол, полученным одним из нас ранее [18]. Результаты расчетов сравниваются между

\* В смесях гексен-1 — метанол, содержащих гексена-1 больше  $x_1 = 0,5$ , при температурах ниже  $20^\circ$  наблюдалось расслаивание.

Таблица 1

## Равновесие жидкость—пар в системе при 55° С

$x_1^{(1)}$	$x_1^{(2)}$	$\alpha_{12}$	$\lg \frac{Y_1}{Y_2}$	$Y_1$	$Y_2$
гексен-1 (1)—метанол (2)					
$b=1,0399; c=0,0584; d=0,2288; p_2^0/p_1^0=0,887$					
0,105	0,496	8,410	0,8717	7,233	1,043
0,201	0,526	4,411	0,5925	4,351	1,142
0,292	0,539	2,837	0,4012	3,093	1,276
0,393	0,541	1,821	0,2081	2,349	1,471
0,431	0,554	1,641	0,1629	2,159	1,562
0,601	0,557	0,835	-0,1277	1,577	2,187
0,746	0,559	0,432	-0,4186	1,258	3,511
0,886	0,569	0,170	-0,8219	1,060	7,676
гексен-1 (1)—этанол (2)					
$b=0,8541; c=0,0456; d=0,0580; p_2^0/p_1^0=0,482$					
0,100	0,535	10,364	0,6985	4,840	1,022
0,200	0,630	6,812	0,5163	3,438	1,085
0,299	0,685	5,094	0,3901	2,600	1,191
0,498	0,688	2,223	0,0302	1,685	1,587
0,724	0,724	1,000	-0,3170	1,198	2,731
0,873	0,770	0,487	-0,6295	1,043	4,741
гексен-1 (1)—изопропанол (2)					
$b=0,6597; c=-0,0284; d=0,1466; p_2^0/p_1^0=0,395$					
0,100	0,513	9,481	0,5735	3,858	1,029
0,201	0,607	6,131	0,3842	2,589	1,104
0,343	0,660	3,718	0,1671	1,816	1,256
0,400	0,673	3,085	0,0859	1,646	1,331
0,598	0,744	1,956	-0,1121	1,295	1,689
0,800	0,817	1,116	-0,3557	1,090	2,554
0,900	0,866	0,718	-0,5473	1,027	3,617
гексен-1 (1)—пропанол (2)					
$b=0,5882; c=-0,0874; d=-0,0070; p_2^0/p_1^0=0,199$					
0,064	0,541	18,421	0,5642	3,706	1,008
0,200	0,740	11,384	0,3551	2,444	1,073
0,398	0,798	5,976	0,0753	1,567	1,294
0,550	0,830	3,995	-0,0996	1,251	1,582
0,800	0,898	2,201	-0,3585	1,035	2,321
0,900	0,944	1,873	-0,4287	1,008	2,705

Таблица 2

## Влияние давления на состав и температуру кипения азеотропов

$P, \text{ мм рт. ст.}$	Гексен-1 (1)—метанол (2)			Гексен-1 (1)—этанол (2)			Гексен-1 (1)—изопропанол (2)		
	$T. \text{ кип.}, ^\circ\text{C}$	$x_1$	$x_2$	$T. \text{ кип.}, ^\circ\text{C}$	$x_1$	$x_2$	$T. \text{ кип.}, ^\circ\text{C}$	$x_1$	$x_2$
760	48,2	0,591	0,409	54,8	0,720	0,280	59,2	0,813	0,187
600	42,0	0,610	0,390	48,6	0,738	0,262	52,1	0,832	0,168
400	32,6	0,617	0,383	39,2	0,774	0,226	41,9	0,854	0,146
200	20,0	0,628	0,372	24,9	0,807	0,193	27,2	0,880	0,120

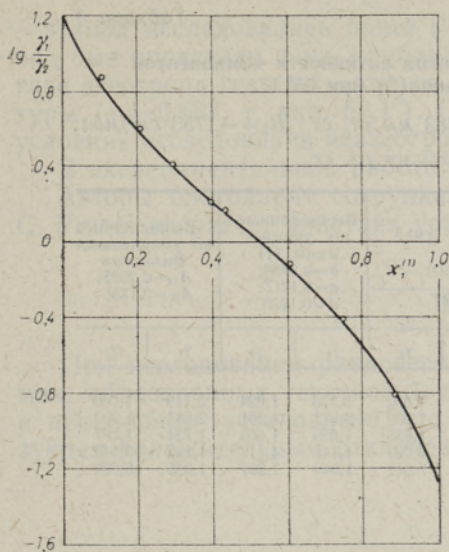


Рис. 1. Зависимость логарифма отношения коэффициентов активности от состава жидкой фазы в системе гексен-1—метанол (2).

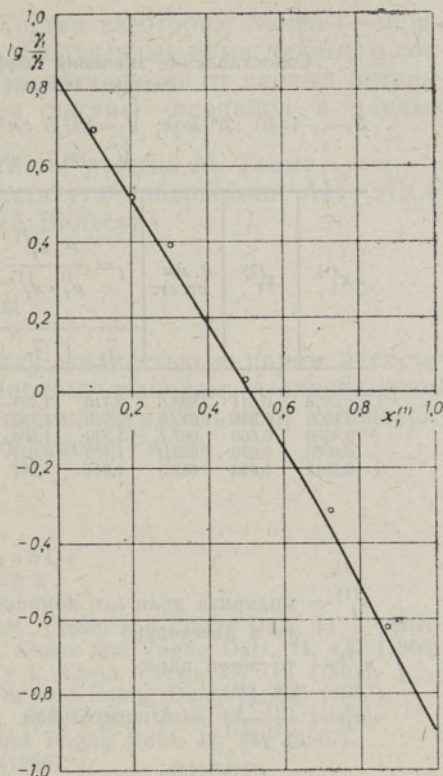


Рис. 2. Зависимость логарифма отношения коэффициентов активности от состава жидкой фазы в системе гексен-1 (1)—этанол (2).

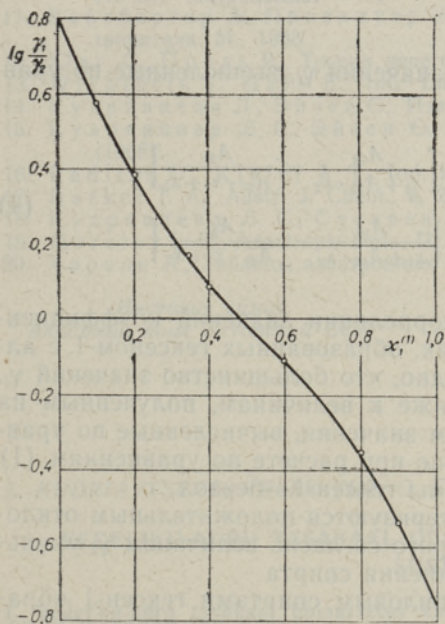


Рис. 3. Зависимость логарифма отношения коэффициентов активности от состава жидкой фазы в системе гексен-1 (1)—изопропанол (2).

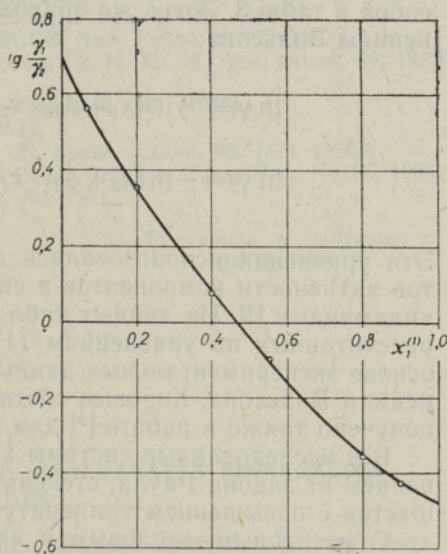


Рис. 4. Зависимость логарифма отношения коэффициентов активности от состава жидкой фазы в системе гексен-1 (1)—пропанол (2).

Таблица 3

## Сопоставление значений коэффициентов активности компонентов системы гексан(1)—этанол(2) при 55° С

$$B_1 = -1410 \text{ см}^3/\text{мол}; \bar{V}_1 = 137,5 \text{ см}^3; p_1^0 = 483 \text{ мм рт. ст.}; B_2 = -1755 \text{ см}^3/\text{мол}; \\ \bar{V}_2 = 60,7 \text{ см}^3; p_2^0 = 280 \text{ мм рт. ст.}$$

$x_1^{(1)}$	$x_1^{(2)}$	$P$ , мм рт. ст.	$\bar{\gamma}_i = \frac{P \cdot x_i^{(2)}}{p_i \cdot x_i^{(1)}}$		$\gamma_i = \bar{\gamma}_i^{\text{exp}} = \frac{(P - p_i)(B_i - \bar{V}_i)}{RT}$		Вычисленные по уравнениям (1) $b=0,9489;$ $c=0,1217;$ $d=0,1228$		Вычисленные по уравнениям Вильсона $A_{12}=0,2825;$ $A_{21}=0,1338$	
			$\bar{\gamma}_1$	$\bar{\gamma}_2$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_1$	$\gamma_2$
0,0978	0,511	528,6	5,716	1,024	5,697	1,002	5,576	1,024	5,119	1,000
0,2995	0,655	650,4	2,945	1,145	2,907	1,109	2,872	1,201	2,633	1,203
0,4980	0,666	667,7	1,849	1,588	1,823	1,535	1,859	1,603	1,734	1,587
0,8003	0,679	668,0	1,169	3,831	1,153	3,701	1,148	4,112	1,142	3,547
0,9012	0,693	652,5	1,041	7,247	1,028	7,011	1,040	7,297	1,045	6,005

## Обозначения

$x_i^{(1)}$ — молярная доля $i$ -го компонента в растворе;	$b, c, d$ — константы уравнений Редлиха—Кистера;
$x_i^{(2)}$ — то же в паре;	$A_{12}$ и $A_{21}$ — константы уравнений Вильсона;
$\alpha_{12} = \frac{x_1^{(2)}/x_1^{(1)}}{x_2^{(2)}/x_2^{(1)}}$ — относительная летучесть;	$B_i$ — второй вириальный коэффициент;
$\gamma_i$ — рациональный коэффициент активности;	$V_i$ — молярный объем компонента $i$ ;
$p_i^0$ — давление пара компонента $i$ ;	$R$ — универсальная газовая константа;
$P$ — общее давление;	$T$ — температура.

собой в табл. 3. Здесь же приводятся значения  $\gamma_i$ , вычисленные по уравнениям Вильсона:

$$\ln \gamma_1 = -\ln(x_1 + A_{12} \cdot x_2) + x_2 \left[ \frac{A_{12}}{x_1 + A_{12} \cdot x_2} - \frac{A_{21}}{A_{21} \cdot x_1 + x_2} \right], \quad (4)$$

$$\ln \gamma_2 = -\ln(x_2 + A_{21} \cdot x_1) - x_1 \left[ \frac{A_{12}}{x_1 + A_{12} \cdot x_2} - \frac{A_{21}}{A_{21} \cdot x_1 + x_2} \right].$$

Эти уравнения использовались для корреляции значений коэффициентов активности компонентов в системах, образованных гексаном-1 с алкиламидами [4]. Из данных табл. 3 видно, что большинство значений  $\gamma_i$ , рассчитанных по уравнениям (1), ближе к величинам, полученным на основе экспериментальных данных, чем значения, вычисленные по уравнениям Вильсона. Хорошее соответствие при расчете по уравнениям (1) получено также в работе [3] для системы гексан-1—бензол.

Все исследованные системы характеризуются положительным отклонением от закона Рауля, степень которого согласно величинам  $\gamma_i$  уменьшается с повышением температуры кипения спирта.

С метиловым, этиловым и изопропиловым спиртами гексан-1 образует положительные азеотропы, изменение составов и температур кипения которых при изменении давления характеризуют данные, приведенные в табл. 2. Азеотропные свойства систем гексан-1—метанол и гексан-1

—этанол исследовались ранее [19, 20]. Состав азеотропа гексен-1—метанол был определен лишь приближенно. Полученные нами данные о составе азеотропа гексен-1—этанол заметно отличаются от данных литературы ( $x_1=0,687$ , т. кип.  $56,1^\circ$ ). Система гексен-1—пропанол в данных условиях исследования неазеотропна.

В экспериментальной работе принимала участие М. Тооме.

Авторы благодарят сотрудника Института кибернетики АН ЭССР С. Ульма за расчет констант уравнений Вильсона.

### Выводы

При исследовании равновесия между жидкостью и паром в системах; образованных гексен-1 с метанолом, этанолом, изопропанолом и пропанолом, установлено, что все системы неидеальны и характеризуются положительным отклонением от закона Рауля.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Suryanarayana Y. S., van Winkle M., Chem. and Engng Data, **11**, 7 (1966).
2. Hollenshead R. N., van Winkle M., Chem. and Engng Data, **11**, 420 (1966).
3. Dojčanský I., Heinrich I., Surový I., Chem. Zvesti, **21**, 713 (1967).
4. Humphrey I. L., van Winkle M., Chem. and Engng Data, **12**, 526 (1967).
5. Hanson D. O., van Winkle M., Chem. and Engng Data, **12**, 319 (1967).
6. Tassios D., van Winkle M., Chem. and Engng Data, **12**, 555 (1967).
7. Steib H., J. prakt. Chem., **4R**, **31**, 138 (1966).
8. Henne A. L., Greenlee K. W., IACS, No. 10, 2020 (1943).
9. Синтезы органических препаратов, сб. 4, М., 1953.
10. Кудрявцева Л., Вийт Х., Эйзен О., Изв. АН ЭССР, Хим. Геол., **17**, 242 (1938).
11. Вейсбергер А., Проскауэр Э., Риддик Дж., Гупс Э., Органические растворители, М., 1958.
12. Юнг С., Праль В., Теория перегонки, М., 1937.
13. Wichterle I., Hala E., Ind. Engng Chem. Fund., **2**, 155 (1963).
14. Кудрявцева Л., Эйзен О., Изв. АН ЭССР, Хим. Геол., **16**, 97 (1967).
15. Кудрявцева Л. С., Эйзен О. Г., Сусарев М. П., Ж. физ. химии, **40**, 1285 (1966).
16. Redlich O., Kister A. T., Ind. Engng Chem., **40**, 345 (1948).
17. Barker I. A., Austr. J. Chem., **6**, 207 (1953).
18. Кудрявцева Л. С., Сусарев М. П., Ж. прикл. химии, **36**, 1471 (1963).
19. Horsley L. H., Azeotropic Data, II Adv. in Chem. Ser. Am. Chem. Soc., No. 35, 1962.
20. Хорсли Л., Таблицы азеотропных смесей, М., 1951.

Институт химии  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
2/XII 1968

L. KUDRJAVTSEVA, HELLE VIIT, O. EISEN

### VEDELIKU-AURU TASAKAAL OLEFIINE SISALDAVATES BINAARSETES SÜSTEEMIDES

1. Vedelik-auru tasakaal binaarsetes süsteemides hekseen-1—metanool, hekseen-1—etanool, hekseen-1—isopropanool ja hekseen-1—propanool

Uuriti vedelik-auru tasakaalu nimetatud binaarsetes süsteemides temperatuuril  $55^\circ\text{C}$ . Tulenuste põhjal arvutati Redlich-Kisteri 4. järku võrrandi konstandid. Võrreldi funktsioone

$\lg \gamma_1/\gamma_2=f(x)$  eksperimentaalselt saadud ja korreleeritud väärtusi. Aseotroopide koostise ja keemistemperatuuride sõltuvus rõhust määrati rektifikatsiooni abil.

L. KUDRJAWZEWA, HELLE VIIT, O. EISEN

## DAS FLÜSSIGKEIT-DAMPF-GLEICHGEWICHT IN DEN DIE OLEFINE BEHALTENDEN BINÄREN SYSTEMEN

### I. Das Flüssigkeit-Dampf-Gleichgewicht der binären Systeme, die Hexen-1 mit Methanol, Äthanol, Isopropanol und Propanol bildet

Isothermes Flüssigkeit-Dampf-Gleichgewicht der genannten binären Systeme wurde bei der Temperatur von 55° C gemessen. Aus den gelieferten Daten wurden die Konstanten der Redlich-Kisterschen Gleichung 4. Ordnung berechnet. Es wurden die gemessenen und die korrelierten Abhängigkeiten  $\lg \gamma_1/\gamma_2=f(x)$  verglichen. Die Abhängigkeit der Zusammensetzung und der Siedetemperatur der Azeotrope vom Drucke wurde durch Rektifikation untersucht.