

## ВЫБОР МЕТОДИК РАСЧЕТА КОНСТАНТ ЛЕНГМЮРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ

© 2019 г. Е. П. Запорожец<sup>а</sup>, Н. А. Шостак<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup> Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

\* e-mail: nikeith@mail.ru

Поступила в редакцию 11.09.2018 г.

После доработки 23.11.2018 г.

Принята к публикации 26.11.2018 г.

С целью повышения точности расчетов параметров гидратных процессов проведена оценка методик определения констант Ленгмюра. При оценке использован косвенный метод, заключающийся в расчете гидратного числа с помощью констант Ленгмюра и его сравнении с известными значениями; критерий оценки – минимальное расхождение этих значений. В результате выполненных исследований обоснован выбор оптимальной методики расчета констант Ленгмюра.

*Ключевые слова:* гидратное число, константы Ленгмюра, методика расчета, параметры гидратов

**DOI:** 10.1134/S0044453719070331

В инженерных расчетах и практических приложениях технологий и техники добычи, сбора, подготовки, транспортировки и переработки углеводородов необходимо определять молекулярные и энергетические параметры процессов образования, роста и диссоциации гидратов индивидуальных газов. В расчетах основных параметров процессов образования, роста и диссоциации газовых гидратов используют различные методы, наиболее распространенные из которых базируются на применении констант Ленгмюра. Константы Ленгмюра обычно определяют экспериментально, расчетным путем с использованием уравнений статистической термодинамики или по упрощенным методикам. Последние широко используются на практике. Однако определяемые константы Ленгмюра для идентичных газов по упрощенным методикам [1–7] приводят к различным результатам, влияющим на точность расчетов параметров гидратных процессов.

Экспериментальные методы требуют специального высокоточного оборудования, высококвалифицированного персонала и времени, длительность которого связана с необходимостью выполнения большого количества измерений в отдельной взятой точке интересующего диапазона термобарических условий. Вычисления с применением принципов статистической термодинамики сложны. При этом необходимо учитывать множество факторов из молекулярной физики, например, направление или харак-

тер движения молекул, их энергетические характеристики – энергии Гиббса и Гельмгольца, химические потенциалы, активности веществ, функции распределения молекул, рассмотрение последних как набора эйнштейновских осцилляторов и пр. В большинстве случаев их невозможно получить или предусмотреть, в частности, для многокомпонентных природных и нефтяных газов.

В практических приложениях широкое распространение получили упрощенные методики расчета констант Ленгмюра. Они отличаются друг от друга по номенклатуре газов, количеству молекул, входящих в малые и большие гидратные полости и математическому описанию. Поэтому определение констант Ленгмюра для идентичных газов по упрощенным методикам приводят к различным результатам и, в конечном итоге, к расхождению величин рассчитываемых гидратных параметров. Однако такие методики широко применяются на практике из-за их простоты и удобства использования. В связи с этим необходим выбор методик определения констант Ленгмюра с целью получения наиболее точных результатов при расчетах параметров гидратов.

*Выбор методик определения констант Ленгмюра выполняли с использованием расчетных ис-*

**Таблица 1.** Расчетные и экспериментальные значения константы Ленгмюра, Па<sup>-1</sup>

Газ	Эксперимент		Расчет (методики)													
			[1]		[2]		[3]		[4]		[5]		[6]		[7]	
	$C'_{p\zeta} \times 10^5$		$C_{s,l} \times 10^5$	$\delta C, \%$												
CH <sub>4</sub>	0.314	[8]	0.182	53.1	0.276	12.8	0.309	1.6	0.545	53.8	0.343	8.8	0.111	95.2	1.749	139.1
Xe	3.413	[8]	–	–	7.425	74.0	–	–	–	–	32.968	162.4	–	–	51.7	175.2
Газ	$C'_{p\zeta} \times 10^5$		$C_{II} \times 10^5$	$\delta C, \%$	$C_{s,l} \times 10^5$	$\delta C, \%$										
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	17	[9]	1.688	163.8	15.031	12.2	15.315	10.4	17.131	0.8	18.485	8.4	7.2	81.0	17.8	4.6
<i>ц</i> -C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	64	[9]	–	–	–	–	–	–	–	–	59.658	7.0	–	–	–	–

следований, в ходе которых находили константы Ленгмюра индивидуальных газов по методикам:

– Нагата–Кобаяши [1]:

$$C_{p\zeta} = 10^{-5} e^{A_{p\zeta} - B_{p\zeta} T}, \quad (1)$$

где  $A_{p\zeta}$  и  $B_{p\zeta}$  – коэффициенты;  $T$  – температура системы, при которой образуется гидрат, К;

– Пэрриша–Прауснитца [2], И. Манка с соавт. [3], В.А. Истомина [4], Х. Хагиги с соавт [7]:

$$C_{p\zeta} = \frac{A_{p\zeta}}{T} e^{\frac{B_{p\zeta}}{T}}, \quad (2)$$

– А. Лахлифи с соавт. [5]:

$$C_{p\zeta} = A_{p\zeta} e^{\frac{B_{p\zeta}}{T}}, \quad (3)$$

– Дж.Б. Клауда–С.И. Сэндлера [6]:

$$C_{p\zeta} = e^{\frac{A_{p\zeta} + \frac{B_{p\zeta}}{T} + \frac{D_{p\zeta}}{T^2}}{T}}, \quad (4)$$

где  $D_{p\zeta}$  – коэффициент. Обобщенным индексом  $p$  обозначаются малые ( $s$ ) или большие ( $l$ ) гидратные полости. Обобщенным индексом  $\zeta$  обозначаются типы кристаллических структур гидратов КС-I или КС-II.

Рассчитанные константы Ленгмюра  $C_{p\zeta}$  по (1)–(4) с использованием методик [1–7] сравнивали с соответствующими экспериментальными значениями констант  $C'_{p\zeta}$  [8, 9] и определяли относительные расхождения их величин:

$$\delta_i = \frac{|C'_{p\zeta} - C_{p\zeta}|}{0.5(C'_{p\zeta} + C_{p\zeta})} \times 100\%. \quad (5)$$

Результаты сравнения представлены в табл. 1. Приведенные экспериментальные значения констант Ленгмюра соответствуют температуре 273.15 К.

Как видно из табл. 1, экспериментальных значений констант Ленгмюра немного. Поэтому оценка методик по прямому сравнению их расчетных и экспериментальных значений не совсем корректна. В связи с этим при выборе методики расчета констант Ленгмюра был использован косвенный метод с применением гидратного числа, которое представляет собой соотношение количества воды к газу в гидрате:

$$n_\zeta = \frac{m_{L_\zeta}}{b_{s_\zeta} \theta_{s_\zeta} + b_{l_\zeta} \theta_{l_\zeta}}, \quad (6)$$

где  $m_{L_\zeta}$  – число молекул воды в кристаллической решетке ячейки гидратов структур КС-I ( $m_{L_I} = 46$ ) и КС-II ( $m_{L_{II}} = 136$ );  $b_{s_\zeta}$  и  $b_{l_\zeta}$  – количества малых ( $b_{s_I} = 2$ ,  $b_{s_{II}} = 16$ ) и больших ( $b_{l_I} = 6$ ,  $b_{l_{II}} = 8$ ) полостей в ячейках кристаллических решеток соответственно структур КС-I или КС-II;  $\theta_{s_\zeta}$  и  $\theta_{l_\zeta}$  – степени заполнения соответственно малых и больших полостей гидрата газом, которые обычно определяют [12] с помощью констант Ленгмюра по формулам:

$$\theta_{s_\zeta} = \frac{C_{s_\zeta} P}{1 + C_{s_\zeta} P}, \quad (7)$$

$$\theta_{l_\zeta} = \frac{C_{l_\zeta} P}{1 + C_{l_\zeta} P}, \quad (8)$$

где  $C_{s_\zeta}$  и  $C_{l_\zeta}$  – константы Ленгмюра соответственно для малых и больших полостей гидратов структур КС-I и КС-II;  $P$  – давление среды, Па.

В соотношении (6) не учитывается количество паров воды, поглощаемых гидратом. С целью учета молекул водяного пара, поглощенных гидратными полостями формула (6) модифицирована нами до вида:

$$n_s = \frac{m_{L_s} + m_{V_s}}{b_{s_s} \frac{C_{s_s} P}{1 + C_{s_s} P} + b_{l_s} \frac{C_{l_s} P}{1 + C_{l_s} P}}, \quad (9)$$

где  $m_{V_s}$  — число молекул водяного пара, поглощенных полостями ячейки кристаллической решетки гидрата, рассчитывается по формуле:

$$m_{V_s} = b_{s_s} \left( 1 - \frac{C_{s_s} P}{1 + C_{s_s} P} \right) + b_{l_s} \left( 1 - \frac{C_{l_s} P}{1 + C_{l_s} P} \right). \quad (10)$$

При выборе методик расчета констант Ленгмюра гидратное число было принято в качестве реперного параметра по следующим соображениям:

– оно служит основной величиной, отражающей кристаллическую структуру гидрата и содержание в ней воды и газа;

– параметры, содержащиеся в расчетном уравнении (9) для гидратного числа, входят в формулы, с помощью которых рассчитываются молекулярная масса и плотность гидратов, число молей гидрата, число молей воды и газа в гидрате, энергии образования и диссоциации гидратов, скорости их роста и разложения;

– для него имеется большее количество данных в открытой печати.

Гидратные числа рассчитывались с применением констант Ленгмюра  $C_{p_{s_i}}$ , определенных по (1)–(4) с использованием методик [1–7]. Расчетные величины гидратных чисел сравнивались с их экспериментальными значениями. Экспериментальные значения гидратных чисел имеются в достаточном количестве [10–29] для выполнения статистического анализа. К сожалению, авторы большинства публикаций не указывали точность измерений, поэтому известные значения использовались без корректировок. Определенные константы Ленгмюра по методикам [1–7] и рассчитанные с их использованием гидратные числа (9) представлены в табл. 2 и 3.

Из массива разных экспериментальных гидратных чисел определялись:

– математическое ожидание:

$$n_a = \sum_{i=1}^k n_i / k, \quad (11)$$

где  $n_i$  —  $i$ -я величина в группе;  $k$  — число величин в группе;

– среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (n_a - n_i)^2}{k}}; \quad (12)$$

– доверительный интервал  $n_x$ , в который входит величина  $n_a$ :

$$n_x = n_a \pm |\varepsilon|, \quad (13)$$

где  $\varepsilon$  — максимальное расхождение экспериментальных данных по гидратным числам  $n_i$  от математического ожидания  $n_a$ ;

– вероятность существования величины  $n_a$  в доверительном интервале  $n_x$ :

$$P(|n_x - n_a| \leq \varepsilon) = 2\Phi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right), \quad (14)$$

где  $\Phi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right)$  — функция Лапласа:

$$\Phi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right) = \Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y e^{-\frac{y^2}{2}} dy, \quad (15)$$

находится по соответствующим таблицам [30].

Значения математических ожиданий  $n_a$  принимались за величины гидратных чисел соответствующих индивидуальных газов с вероятностью  $P$  от 0.82 до 0.92. Значения  $n_a$ ,  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $n_x$  и  $P$  приведены в табл. 4. Найденные значения гидратных чисел индивидуальных газов сравнивались с соответствующими им величинами, рассчитанными с учетом констант Ленгмюра, определенных по методикам [1–7] (см. табл. 2, 3). При этом определялись относительные величины их расхождения (табл. 5):

$$\delta_i = \frac{|n_a - n_{p_i}|}{n_a} \times 100\%. \quad (16)$$

По значениям величин расхождения  $\delta_i$  оценивали пригодность той или иной методики определения констант Ленгмюра. Минимальная величина расхождения служила критерием для рекомендации к использованию методики, применительно к расчетам констант Ленгмюра конкретного газа.

Минимальные расхождения сопоставляемых величин соответствуют методикам:

– Пэрриша–Прауснитца (2), [2] для  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{Kr}$ ,  $\text{Xe}$ ;

– А. Лахлифи с соавт. (3), [5] для  $\text{C}_2\text{H}_6$  и  $\text{H}_2\text{S}$ ;

– Дж.Б. Клауда–С.И. Сэндлера (4), [6] для  $\text{C}_3\text{H}_8$ ;

– Нагата–Кобаяши (1), [1] и Х. Хагиги с соавт. (2) [7] для  $i$ - $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ;

– И. Манка с соавт. (2), [3] для  $\text{CO}_2$ .

Таблица 2. Расчетные значения констант Ленгмюра ( $C_{ps}$ , Па<sup>-1</sup>) и гидратных чисел  $n$  при 273.15 К структуры КС-I по методикам [1–7]

Газ	Методики																	
	[1]		[2]		[3]		[4]		[5]		[6]		[7]					
	$C_{ps}^{II} \times 10^5$	$C_{ps}^{VI} \times 10^5$																
CH <sub>4</sub>	0.182	0.217	0.276	1.517	6.10	6.09	0.545	2.536	5.94	0.343	5.928	5.96	0.111	0.639	6.57	0.175	0.089	6.01
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.203	1.688	0*	15.031	7.78	7.78	0	17.131	7.77	0	18.485	7.76	0.00002	7.194	8.24	0	1.780	7.76
CO <sub>2</sub>	0.342	0.419	0.155	5.071	6.48	6.30	9.160	5.119	5.84	0.042	1407.734	6.98	0.050	2.057	7.26	0.0002	0.691	8.03
H <sub>2</sub> S	17.444	3.490	9.676	33.768	6.08	6.59	4.583	46.400	6.21	29.337	215.649	5.83	–	–	–	0.038	7.723	7.37
O <sub>2</sub>	–	–	0.324	0.146	6.09	–	–	–	–	5.728	8.731	5.75	–	–	–	–	–	–
N <sub>2</sub>	0.020	0.024	0.045	0.308	6.07	5.98	0.055	0.254	6.05	1.441	4.693	5.76	0.083	0.170	6.06	–	–	–
Ar	–	–	0.328	0.310	5.98	–	–	–	–	0.778	0.795	5.84	–	–	–	–	–	–
Kr	–	–	2.027	1.622	5.99	–	–	–	–	9.008	12.038	5.79	–	–	–	–	–	–
Xe	–	–	7.425	0.621	6.05	–	–	–	–	32.968	258.159	5.80	–	–	–	0.005	5.165	7.90
Ne	–	–	–	–	–	–	–	–	–	7979.042	112.109	5.75	–	–	–	–	–	–
H <sub>2</sub>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.049	0.413	5.77	0.002	0.005	6.35	–	–	–
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.4 × 10 <sup>-6</sup>	1.728	8.94	–	–	–	–	–	–
SO <sub>2</sub>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.109	70551.660	7.16	–	–	–	–	–	–
<i>n</i> -C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	59.658	8.24	–	–	–	–	–	–

**Таблица 3.** Расчетные значения констант Ленгмюра ( $C_{ps}$ , Па<sup>-1</sup>) и гидратных чисел  $n$  структуры КС-II при 273.15 К по методикам [1–7]

Газ	Методики											
	[1]			[2]			[3]			[4]		
	$C_{м.п} \times 10^5$	$C_{б.п} \times 10^5$	$n_{p_1}$	$C_{м.п} \times 10^5$	$C_{б.п} \times 10^5$	$n_{p_2}$	$C_{м.п} \times 10^5$	$C_{б.п} \times 10^5$	$n_{p_3}$	$C_{м.п} \times 10^5$	$C_{б.п} \times 10^5$	$n_{p_4}$
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0	287.407	17.04	0	457.978	17.02	0	472.689	17.02	0	1759.948	17.01
<i>i</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0	454.751	17.04	0	692.419	17.02	0	763.053	17.02	0	2747.209	17.01
<i>ц</i> -C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	–	–	–	0	1204.285	17.02	–	–	–	–	–	–

  

Газ	Методики								
	[5]			[6]			[7]		
	$C_{м.п} \times 10^5$	$C_{б.п} \times 10^5$	$n_{p_5}$	$C_{м.п} \times 10^5$	$C_{б.п} \times 10^5$	$n_{p_6}$	$C_{м.п} \times 10^5$	$C_{б.п} \times 10^5$	$n_{p_7}$
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0	1245.054	17.01	0	72.746	17.14	0	287.407	17.04
<i>i</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0	4096.446	17.00	–	–	–	0	454.751	17.04
<i>ц</i> -C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0	64774.000	17.00	–	–	–	–	–	–

**Таблица 4.** Результаты статистической обработки экспериментальных значений гидратных чисел ( $n_i$ ) в квадрупольной точке при температуре 273.15 К ( $n_a$  – математическое ожидание,  $n_x$  – доверительный интервал,  $P$  – вероятность, с которой определена величина  $n_a$ )

Газ	Источник	$n_i$	$n_a$	$\sigma$	$\epsilon$	$n_x$	$P$
CH <sub>4</sub>	[10]	6.3	6.04	0.17	0.27	5.77–6.31	0.888
	[11]	5.9					
	[12]	6					
	[13]	5.77					
	[14]	6 ± 0.16					
	[15]	6.3					
	[16]	6 ± 0.01					
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	[17]	6.05 ± 0.06	7.65	0.44	0.65	7.00–8.30	0.861
	[10]	7					
	[12]	8.25					
	[18]	7.67					
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	[16]	7.67	17.50	0.34	0.50	17.00–18.00	0.861
	[10]	17.4					
	[16]	17.7					
	[19]	17.9					
<i>i</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	[21]	17	17.30	0.26	0.40	16.90–17.70	0.876
	[22]	17.5 ± 0.2					
	[23]	17.1					
CO <sub>2</sub>	[14]	17.1	6.25	0.43	0.75	5.50–7.00	0.918
	[10]	6					
	[12]	6					
	[12]	7					
H <sub>2</sub> S	[24]	6	5.89	0.14	0.19	5.75–6.08	0.835
	[10]	5.7					
	[14]	6					
O <sub>2</sub>	[21]	5.98	6.05	0.20	0.27	5.78–6.32	0.823
	[25]	6.06 ± 0.21					
	[25]	6.01 ± 0.23					
	[26]	6.11					
N <sub>2</sub>	[25]	6.21	–	–	–	–	–
Ar	[27]	6.67	–	–	–	–	–
Kr	[28]	6.10	–	–	–	–	–
Xe	[29]	6.29	–	–	–	–	–

**Таблица 5.** Относительные расхождения величин гидратных чисел, рассчитанных по методикам [1–7], от математического ожидания их экспериментальных значений, %

Газ	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$	$\delta_6$	$\delta_7$
CH <sub>4</sub>	16.23	0.99	0.83	1.66	1.32	8.77	0.50
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.61	1.70	1.70	1.57	1.44	7.71	1.57
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.63	2.74	2.74	2.80	2.80	2.06	2.63
<i>i</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1.50	1.62	1.62	1.68	1.73	–	1.50
CO <sub>2</sub>	13.92	3.68	0.80	6.56	11.68	16.16	28.48
H <sub>2</sub> S	24.11	3.23	11.88	5.43	1.02	–	25.13
O <sub>2</sub>	–	0.66	–	–	4.96	–	–
N <sub>2</sub>	21.90	2.25	3.70	2.58	7.25	2.42	–
Ar	–	10.34	–	–	12.44	–	–
Kr	–	1.80	–	–	5.08	–	–
Xe	–	3.82	–	–	7.79	–	25.60

Сравнение величин расхождения показывает, что с практической точки зрения по применению методики расчета констант Ленгмюра предпочтительна методика Пэрриша–Прауснитца [2], которая дает отклонения, приемлемые для инженерных приложений. Для точных расчетов необходимо использовать методики, дающие минимальные величины расхождений (см. табл. 5).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Nagata I., Kobayashi R. // *Ind. End. Chem. Fundamentals*. 1966. V. 5. № 3. P. 344.
- Parrish W.R., Prausnitz J.M. // *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 1972. V. 11. № 1. P. 26.
- Munck I., Skjold-Jorgensen S., Rasmussen P. // *Chem. Eng. Sci.* 1988. V. 43. № 5. P. 2661.
- Истомин В.А. Термодинамическое моделирование газогидратных систем для решения задач добычи газа: Дис. ... докт. хим. наук. М.: ВНИИ природных газов и газовых технологий, 1999. 285 с.
- Lakhlifi A., Dahoo P.R., Picaud S., Mousis O. // *Chemical Physics*. 2015. V. 448. P. 53.
- Klauda J.B., Sandler S.I. // *Chemical Engineering Science*. 2003. V. 58. P. 27.
- Haghighi H., Burgess R., Chapoy A., Tohidi B. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008)*. Vancouver. British Columbia. Canada, 2008.
- Barrer R.M., Ruzicka D.J. // *Trans. Faraday Soc.* 1962. V. 58. P. 2239.
- Sparks K.A., Tester J.J. // *Phys. Chem.* 1992. V. 96. P. 11022.
- Claussen W.F. // *J. Chem. Phys.* 1951. V. 19. P. 1425.
- Хорошилов В.А. // *Газовая промышленность*. 1964. Т. 9. С. 12.
- Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. *Газовые гидраты*. М.: Химия, 1980. 296 с.
- Glew D.N., Hagget M.L. // *Can. J. Chem.* 1968. V. 46. P. 3867.
- Истомин В.А., Якушев В.С. *Газовые гидраты в природных условиях*. М.: Недр, 1992. 236 с.
- Diepen G.A., Scheffer F.E. // *Requiel. Trav. Chim.* 1950. V. 69. P. 593.
- Handa Y.P. // *J. Chem. Thermodyn.* 1986. V. 18. P. 915.
- Ripmeester I.A., Ratcliffe C.I. // *J. Phys. Chem.* 1988. V. 92. P. 337.
- Davidson D.W. In: *Natural Gas Hydrates: Properties, Occurrence and Recovery* / Eds. J. Cox. Boston: Butterworth Publishers. Woburn. Massachusetts, 1983. P. 1.
- Barduhn A.J., Towilson H.E., Yee C.H. // *A. I. Ch. E. J.* 1962. V. 8. P. 176.
- Ceccoti P.J. // *Ind. Eng. Chem. Fundamentals*. 1966. V. 5. P. 106.
- Cady G.H. // *J. Phys. Chem.* 1983. V. 87. P. 4437.
- Rouher O., Barduhn A.I. // *Desalination*. 1969. V. 6. P. 57.
- Gough S.R., Davidson D.W. // *Can. J. Chem.* 1971. V. 49. P. 2691.
- Villard P. // *Annales de Chemie et de Physique*. 1897. V. 11. P. 353.
- Cleef (van) A., Diepen G.A.M. // *Recueil. Trav. Chim.* 1960. V. 79. P. 582.
- Cleef (van) A., Diepen G.A.M. // *Recueil. Trav. Chim.* 1965. V. 84. P. 1085.
- Saito S., Marshall D.R., Kobayashi R. // *A. I. Ch. E. J.* 1964. V. 10. P. 734.
- Handa Y.P. // *J. Chem. Thermodyn.* 1986. V. 18. P. 891.
- Davidson D.W., Handa Y., Ripmeester J.A. // *J. Phys. Chem.* 1986. V. 90. P. 6549.
- Гмурман В.Е. *Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов*. 9-е изд. стер. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.