

Термофизические свойства криопротекторов.**IV. Теплоемкость ряда криопротекторов, их водных растворов и смесей**

UDC 547.42:536.63

A.F. TODRIN*, L.I. POPIVNIENKO, E.A. GORDIENKO

Thermophysical Properties of Cryoprotective Agents**IV. Thermal Capacity of Some Cryoprotective Agents, Their Aqueous Solutions and Mixtures**

Систематизированы литературные данные по теплоемкости воды, чистых криопротекторов, их водных растворов и смесей. Построены эмпирические полиномиальные уравнения для расчета теплоемкости воды и чистых криопротекторов в зависимости от температуры. Для водных растворов криопротекторов и их смесей получены эмпирические полиномиальные уравнения в зависимости от температуры при фиксированных концентрациях или в зависимости от концентрации при фиксированных температурах. Получены коэффициенты полиномов для этих уравнений.

Ключевые слова: криопротектор, теплоемкость, эмпирические полиномиальные уравнения.

Систематизовано літературні дані по теплоємності води, чистих криопротекторів, їх водних розчинів і сумішей. Побудовано емпіричні поліноміальні рівняння для розрахунку теплоємності води і чистих криопротекторів в залежності від температури. Для водних розчинів криопротекторів та їх сумішей отримано емпіричні поліноміальні рівняння в залежності від температури при фіксованих концентраціях або в залежності від концентрації при фіксованих температурах. Отримано коефіцієнти поліномів для цих рівнянь.

Ключові слова: криопротектор, теплоємність, емпіричні поліноміальні рівняння.

The literature data for thermal capacity of water, pure cryoprotective agents, their aqueous solutions and mixtures are summarized. The empiric polynomial equations for calculation of thermal capacity of water and pure cryoprotective agents depending on temperature are derived. The empiric polynomial equations for aqueous solutions of cryoprotective agents and their mixtures depending on temperature under fixed concentrations or concentration under fixed temperatures are derived. The coefficients of polynomials for these equations are derived.

Key words: cryoprotective agent, thermal capacity, empiric polynomial equations.

Важная роль теплоемкости воды и водных растворов криопротекторов в процессе криоконсервирования не вызывает сомнений, поскольку от ее величины зависит количество тепла, которое необходимо отвести (или подвести) от консервируемого объекта для изменения его температуры. Температура и состав (например, концентрация криопротектора) образца влияют на величину его теплоемкости. Особенно это заметно в момент кристаллизации и плавления: теплоемкость резко возрастает. Наблюдается существенное увеличение теплоемкости при переохладении воды (рисунок) и водных растворов криопротекторов по сравнению со значениями теплоемкости в зоне положительных температур. Для более качественного управления процессами замораживания-отогрева необходимо знать зависимость теплоемкости замораживаемых растворов от температуры и концентрации.

The important role of thermal capacity of water and aqueous solutions of cryoprotectants during cryopreservation is of no doubt, since it influences the amount of heat required to be taken off (or to be applied) from the object to be cryopreserved for changing its temperature. Temperature and composition (e.g. cryoprotectant concentration) of the sample affect the value of its thermal capacity. Especially it is evident during crystallization and melting: the thermal capacity is sharply increased. The significant increase of thermal capacity during cooling of water (Figure) and aqueous solutions of cryoprotectants if compared with the values of thermal capacity within the range of positive temperatures is observed. It is necessary to know the dependence of thermal capacity of freezing solutions vs. temperature and concentration to control freeze-thawing processes with confidence.

However, the available references do not represent the summarized data on thermal capacity for cryopro-

Институт проблем криобиологии и криомедицины
НАН Украины, г. Харьков

Institute for Problems of Cryobiology and Cryomedicine of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, Ukraine

* Автор, которому необходимо направлять корреспонденцию:
ул. Переяславская, 23, г. Харьков, Украина 61015; тел.: (+38 057) 373-38-71, факс: (+38 057) 373-30-84, электронная почта:
todrin@mail.ru

* To whom correspondence should be addressed: 23,
Pereyaslavskaya str., Kharkov, Ukraine 61015; tel.:+380 57 373
3871, fax: +380 57 373 3084, e-mail: todrin@mail.ru

Зависимости теплоемкостей воды (●) и льда (▲) от температуры.

Dependencies of water (●) and ice (▲) thermal capacities vs. temperature.

Однако в доступной литературе отсутствуют систематизированные данные по теплоемкости криопротекторов, имеются только отдельные их значения. Накопление и анализ соответствующего экспериментального материала, его систематизация позволят более продуктивно использовать криозащитные вещества, которые существенно влияют на природу и кинетику кристаллизационных процессов в биообъектах при их замораживании и отогреве.

Цель работы – обобщение и систематизация литературных данных на основе построения эмпирических формул для расчета значений теплоемкости чистых криопротекторов, их водных растворов и смесей в зависимости от массовой концентрации криопротектора и температуры.

Экспериментальные данные, приведенные в литературе, по теплоемкости криопротекторов, их водных растворов и смесей были обработаны с помощью программы Microsoft Office Excel 2003. Были также обработаны экспериментальные литературные данные для воды, льда и ряда водных растворов веществ, которые крайне важны как в жизнедеятельности человека, так и в криобиологии.

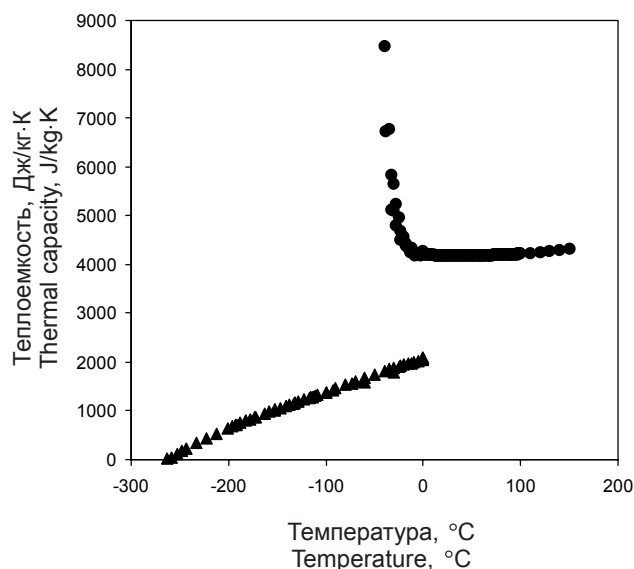
Значения теплоемкости воды в зависимости от температуры приведены в [1, 2, 8, 17, 20, 25, 39, 42, 45, 52, 58, 59], данные по теплоемкости льда взяты из [10, 14, 24, 42, 56, 58, 61]. Полученные зависимости представлены на рисунке.

Верхняя кривая на рисунке, показывающая зависимость теплоемкости воды от температуры, может быть разбита на две части (зона положительных температур и зона переохлаждения), каждая из которых хорошо описывается полиномами пятой степени относительно температуры. Для воды при положительных температурах эмпирическое уравнение для расчета теплоемкости имеет вид:

$$C_p = -2,476 \times 10^{-8} t^5 + 1,031 \times 10^{-5} t^4 - 1,568 \times 10^{-3} t^3 + 0,1164 t^2 - 3,868 t + 4222,8,$$

где t – температура, °C. Это уравнение позволяет рассчитать теплоемкость воды в диапазоне температур от 0 до 150°C при дисперсии аппроксимации $R^2 = 0,968$. В результате расчета получаем значение теплоемкости воды в Дж/кг·К.

Для переохлажденной воды в интервале температур $-40 \div 0^\circ\text{C}$ теплоемкость может быть рассчитана по формуле (при $R^2 = 0,9519$):



tectants, and only single values are shown. Collection and analysis of corresponding experimental material and its systematisation will enable more efficient application of the cryoprotective substances that significantly affect the nature and kinetics of crystallization processes in bioobjects during freezing and thawing.

The research aim is to summarize and systematize the literature data on the base of deriving the empiric equations to calculate the values of thermal capacity of pure cryoprotective agents, their aqueous solutions and mixtures depending on cryoprotectant mass concentration and temperature.

The experimental data found in literature for thermal capacity of cryoprotective agents, their aqueous solutions and mixtures were processed with Microsoft Office Excel 2003 software. There were also processed the experimental literature data for water, ice and some aqueous solutions concerning the properties, being absolutely essential both for human vital activity and cryobiology.

The values of thermal capacity of water depending on temperature are presented in literature sources [1, 2, 8, 17, 20, 25, 39, 42, 45, 52, 58, 59], thermal capacity of ice data are taken from the sources [10, 14, 24, 42, 56, 58, 61]. The obtained dependencies are presented in the Figure.

The upper curve in the Figure, showing the dependence of water thermal capacity vs. temperature, can be divided into two parts (zone of positive temperatures and supercooling zone), each of them could be well described with polynomials of the fifth degree in respect of temperature. For water at positive temperatures the empiric equation for thermal capacity calculation is as follows:

$$C_p = -2.476 \times 10^{-8} t^5 + 1.031 \times 10^{-5} t^4 - 1.568 \times 10^{-3} t^3 + 0.1164 t^2 - 3.868 t + 4222.8,$$

$$C_p = -3,666 \times 10^{-4} t^5 - 2,893 \times 10^{-2} t^4 - 0,8293 t^3 - 8,456 t^2 - 25,94 t + 4222,8.$$

Теплоемкость льда (нижняя кривая на рисунке) может быть описана следующим полиномиальным уравнением ($R^2 = 0,9992$):

$$C_p = 5,357 \times 10^{-5} t^3 + 0,01369 t^2 + 7,783 t + 2082,7.$$

Данное уравнение может быть применено в диапазоне температур $-263 \div 0^\circ\text{C}$.

Для чистых криопротекторов и их водных растворов зависимость теплоемкости от температуры описывается полиномом:

$$C_p = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0. \quad (1)$$

Значения коэффициентов $a_5 \div a_0$ полинома (1) для ряда чистых криопротекторов представлены в табл. 1, а для ряда водных растворов криопротекторов – в табл. 2. Для соблюдения размерности принимается: $a_5 - \text{Дж}/(\text{кг} \times ^\circ\text{C}^6)$, $a_4 - \text{Дж}/(\text{кг} \times ^\circ\text{C}^5)$, $a_3 - \text{Дж}/(\text{кг} \times ^\circ\text{C}^4)$, $a_2 - \text{Дж}/(\text{кг} \times ^\circ\text{C}^3)$, $a_1 - \text{Дж}/(\text{кг} \times ^\circ\text{C}^2)$, $a_0 - \text{Дж}/(\text{кг} \times ^\circ\text{C})$.

Для определения теплоемкости водных растворов веществ в зависимости от их массовой концентрации или смесей криопротекторов в зависимости от массовой концентрации одного из них используется полиномиальное уравнение:

$$C_p = b_4 C^4 + b_3 C^3 + b_2 C^2 + b_1 C + b_0, \quad (2)$$

где C – массовая концентрация криопротектора, %. Коэффициенты $b_4 \div b_0$ имеют размерность $\text{Дж}/(\text{кг} \times ^\circ\text{C})$. Значения коэффициентов $b_4 \div b_0$ полинома (2) для водных растворов криопротекторов приведены в табл. 3, а для смесей криопротекторов – в табл. 4.

В табл. 1–4 представлены коэффициенты полиномов для расчета теплоемкости криопротекторов, находящихся как в жидком состоянии, так и в замороженном (твёрдая фаза).

Кроме коэффициентов полиномов, в таблицах представлены дисперсии аппроксимации, диапазоны применения уравнений (температура или концентрация) и источники литературы, из которых взяты экспериментальные данные. Диапазон применения уравнений показывает, при каких температурах или концентрациях были получены экспериментальные данные, приведенные в литературных источниках. При вычислениях этот диапазон может быть расширен без существенной потери точности, особенно для линейных уравнений. В таблицах приняты следующие условные обозначения:

where t is the temperature, $^\circ\text{C}$. This equation enables to calculate the aqueous thermal capacity within the range of temperatures from 0 to 150°C at approximation dispersion $R^2 = 0.968$. The calculation gives the value of water thermal capacity in $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$.

For supercooled water within the interval of temperatures $-40 \div 0^\circ\text{C}$ its thermal capacity is calculated with the formula (at $R^2 = 0.9519$):

$$C_p = -3.666 \times 10^{-4} t^5 - 2.893 \times 10^{-2} t^4 - 0.8293 t^3 - 8.456 t^2 - 25.94 t + 4222.8.$$

Ice thermal capacity (lower curve in the Figure) could be described with polynomial equation (at $R^2 = 0.9992$):

$$C_p = 5.357 \times 10^{-5} t^3 + 0.01369 t^2 + 7.783 t + 2082.7.$$

This equation is applicable within the range of temperatures $-263 \div 0^\circ\text{C}$.

For pure cryoprotective agents and their aqueous solutions the dependence of thermal capacity vs. temperature is described with the polynomial:

$$C_p = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0. \quad (1)$$

The values of coefficients $a_5 \div a_0$ in polynomial (1) for some pure cryoprotective agents are given in Table 1 and for some aqueous solutions of cryoprotective agents are presented in Table 2. To keep the dimensions it is assumed that: $a_5 - \text{J}/(\text{kg} \times ^\circ\text{C}^6)$, $a_4 - \text{J}/(\text{kg} \times ^\circ\text{C}^5)$, $a_3 - \text{J}/(\text{kg} \times ^\circ\text{C}^4)$, $a_2 - \text{J}/(\text{kg} \times ^\circ\text{C}^3)$, $a_1 - \text{J}/(\text{kg} \times ^\circ\text{C}^2)$, $a_0 - \text{J}/(\text{kg} \times ^\circ\text{C})$.

To determine the thermal capacity of substances' aqueous solutions depending on their mass concentration or mixtures of cryoprotective agents depending on their mass concentration of one of them there is used the polynomial equation:

$$C_p = b_4 C^4 + b_3 C^3 + b_2 C^2 + b_1 C + b_0, \quad (2)$$

where C is mass concentration of the cryoprotective agent, %. Coefficients $b_4 \div b_0$ have the dimensions of $\text{J}/(\text{kg} \times ^\circ\text{C})$. The values of coefficients $b_4 \div b_0$ of polynomial (2) for aqueous solutions of cryoprotective agents are presented in Table 3, and for mixtures of cryoprotective agents are shown in Table 4.

Tables 1–4 represent the coefficients of polynomials for calculation of thermal capacity of cryoprotective agents, being either in liquid or in frozen (solid) state.

Besides the polynomial coefficients the Tables show the approximation dispersion, application range of equations (temperature and concentration) and literature sources from which the experimental data are derived. The application range of equations shows under which temperatures and concentrations the experimental data,

БД – бутандиол;
 ДМАц – диметилацетамид;
 ДМСО – диметилсульфоксид;
 ДМФА – диметилформамид;
 ДЭГ – диэтиленгликоль;
 ММЭГ – монометилловый эфир глицерина;
 МФА – метилформамид;
 МХГГ – монохлоргидрин глицерина;
 МЭЭГ – моноэтиловый эфир глицерина;
 ПВП – поливинилпирролидон;
 ПД – пропандиол;
 ПЭО – полиэтиленоксид;
 ТЭГ – триэтиленгликоль;
 ФА – формамид;
 ЭГ – этиленгликоль.

В связи с тем, что для ряда криопротекторов и их растворов имеется недостаточно экспериментальных данных для построения эмпирических формул, в табл. 5 приводятся конкретные значения теплоемкости некоторых веществ и их водных растворов.

presented in the papers were obtained. During calculation this range may be extended without significant loss of accuracy, especially for linear equations.

The following abbreviations are used in the Tables:

BD – butane diol;
 DMAc – dimethyl acetamide;
 DMSO – dimethyl sulfoxide;
 DMFA – dimethyl formamide;
 DEG – diethylene glycol;
 MCHG – monochlohydrin glycerol;
 MEEG – monoethyl ether of glycerol;
 PVP – polyvinylpyrrolidone;
 PD – propane diol;
 PEO – polyethylene oxide;
 MMEG – monomethyl ether of glycerol;
 MFA – methyl formamide;
 TEG – triethylene glycol;
 FA – formamide;
 EG – ethylene glycol.

Due to the fact that for some cryoprotective agents and their solutions there are no sufficient experimental data to derive the empirical equations we present the certain values of thermal capacity of some substances and their aqueous solutions in Table 5.

Таблица 1. Коэффициенты уравнения (1) для расчета теплоемкости ряда чистых криопротекторов в зависимости от температуры; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнения

Table 1. Coefficients of equation (1) to calculate thermal capacity of some pure cryoprotective agents depending on temperature, approximation dispersion and temperature ranges of equation application

Вещество Substance		$a_3, \times 10^{-8}$	$a_4, \times 10^{-5}$	$a_3, \times 10^{-3}$	$a_2, \times 10^{-2}$	a_1	a_0	R^2	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник Reference
Амиды Amides	Ацетамид (тв. фаза) Acetamide (solid phase)	0	0	12,7	-169,1	73,349	346,18	0,9913	27+77	[34]
	ДМАц DMAc	0	0	0	0	2,1762	1959,2	0,9996	4+100	[51]
	ДМФА DMFA	0	0	0,04	0,136	1,6437	2009,3	0,9335	-20+100	[2,11,15,31,46,51]
Амино – кислоты Amino acids	DL-α-аланин DL-α-alanine	0	0	0	0,75	2,383	1211,7	0,998	25+75	[13]
	L-α-аланин L-α-alanine	0	0	0	0,21	2,8555	1219,4	0,999		
	β-аланин β-alanine	0	0	0	0,96	2,293	1163,5	1,0		
	D-валин D-valine	0	0	0	0,41	3,2081	1266,9	0,9996		
	DL-валин DL-valine	0	0	0	0,33	3,9311	1302,5	0,9989		
	Глицин Glycine	0	0	0	0	3,7944	1169,8	0,9992		
	L-лейцин L-leucine	0	0	0	6,35	1,442	1378,4	0,9997		

Продолжение табл. 1
Table 1. (Continued from the previous page)

Вещество Substance		$a_3, \times 10^{-8}$	$a_4, \times 10^{-5}$	$a_3, \times 10^{-3}$	$a_2, \times 10^{-2}$	a_1	a_0	R^2	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник Reference
Водорастворимые полимеры Water soluble polymers	ПЭО-400 (тв. фаза) PEO-400 (solid phase)	38,99	22,3	48,42	497,1	246,28	5932,3	0,9692	-193+ -10	[16,21,22], а также собственные данные plus own data
	ПЭО-400 PEO-400	0	0	198,2	-1227	178,97	7444,8	0,9819	-8+30	
Сульфиды Sulfoxides	ДМСО DMSO	0	0	0	0	1,6695	1926,5	0,9992	18+150	[2,33,36, 38,51,54]
Спирты Alcohols	Глицерин Glycerol	0	0	0	-1,54	5,7093	2267,4	0,9324	20+150	[2,7,21,22, 39,43,47,52]
	Глицерин (тв. фаза) Glycerol (solid phase)	16,2	7,551	13,02	100,5	36,72	1622	0,9774	-170+15	
	ДЭГ DEG	0	0	0	0	4,1951	2218,1	0,9999	5+100	[51]
	Маннит (тв. фаза) Mannitol (solid phase)	0	0	-0,0165	-0,378	4,5716	1315,5	0,9998	-190+115	[57]
	Метанол Methanol	0	0	0	2,91	4,8418	2411,5	0,9843	-93+64	[2,30,45,46, 49,55]
	Метанол (тв. фаза) Methanol (solid phase)	0	0	0	-5,6	-8,9057	1519,6	0,9989	-263+ -123	[30]
	МХГГ MCHG	0	0	0	0,1047	5,046	1962,8	0,9922	-80+40	[3,5,6]
	ТЭГ TEG	0	0	0	-1,21	5,4429	2076,7	0,9252	0+115	[51,55]
	ЭГ EG	0	0	0	0,379	4,3693	2301,4	0,9852	-18+150	[2,7,47,51, 56]
	Этанол Ethanol	0	0	-0,07448	4,398	7,108	2243	0,9548	-65+110	[2,9,14,15, 37,46,47,56]
	1,2-ПА 1,2-PD	0	0	0	0,32	5,4918	2366,7	0,9897	-18+115	[31,51,62]
	1,3-ПА 1,3-PD	0	0	0	1,4	6,596	2284,4	0,9992	-120+40	[3,5]
1,4-БА 1,4-PD	0	0	0	0	8,7041	2026,2	1,0	20+150	[27]	
Углеводы Carbohydrates	Сахароза Sucrose	0	0	0	0	3,5081	1164	0,9998	0+100	[48]
Эфиры Ethers	ММЭГ MMEG	0	0	0	1,95	5,9356	2223,9	0,9985	-90+30	[3,5]
	МЭЭГ MEEG	0	0	0	1,93	6,3412	2316,5	0,9976	-90+30	

Таблица 2. Коэффициенты уравнения (1) для расчета теплоемкости ряда водных растворов криопротекторов в зависимости от температуры; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнения
Table 2. Coefficients of equation (1) to calculate thermal capacity of some cryoprotective agents' aqueous solutions depending on temperature, approximation dispersion and temperature ranges of equation application

Вещество Substance		Концентрация, % масс. Concentration, % mass.	$a_3, \times 10^{-5}$	$a_4, \times 10^{-3}$	$a_5, \times 10^{-2}$	a_2	a_1	a_0	R^2	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник Reference		
Сульф-оксиды Sulfoxides	DMCO	10 (тв. фаза/solid)	280	365	1861,9	462,1	5651,1	30498	0,9969	- 40+ - 6	[26]		
	Глицерин Glycerol	29,9	0	0	0	0	8,9463	3604,9	0,9021	- 6,6+2	[2]		
39,91		0	0	0	0	11,172	3480,7	0,9564	- 14,8+2				
50,07		0	0	0	0	15,263	3320	0,9945	- 20,4+2				
60		0	0	0	0	16,662	3067,7	0,9971	- 31,6+2				
Метанол Methanol		0,71	0	0	- 0,02	0,0503	- 3,019	4228,5	1,0	17+75			
		1,537	0	- 0,0127	0,2443	- 0,161	4,466	4166	1,0	20+75			
		5,55	0	- 0,0086	0,1566	- 0,079	1,591	4203	0,9959	16+75			
		10,36	0	0	0	0	0,9608	4204	0,999	20+76			
		14,34	0	0	0	0	1,8494	4170,9	0,9939	16+75			
		18,92	0	0	0	0	2,3988	4125,2	0,9966	15+74			
Спирты Alcohols		ЭГ EG	11	0	0	0	0	1,7694	3937,9	0,999		- 1+120	[60]
			21,8	0	0	0	0	2,3028	3771	0,9998		- 6+120	
			32,4	0	0	0	0	2,8446	3590,6	0,9999		- 12+120	
			42,7	0	0	0	0	3,352	3403,6	0,9999		- 18+120	
			52,8	0	0	0	0	3,8651	3205,3	1,0		- 29+120	
			81,7	0	0	0	0	5,3329	2558	1,0		- 34+120	
1,2-ПА 1,2-PD		5,2 (тв. фаза/solid)	2,7778	8,2639	96,8	56,007	1619,6	21000	1,0	- 80+ - 20		[4,60]	
		10,4 (тв. фаза/solid)	5,6944	17,097	201,68	116,72	3325,4	39700	1,0	- 80+ - 20			
	10,4	0	0	0	0,0046	0,5409	4071,6	0,987	- 1+160				
	20,5 (тв. фаза/solid)	0	- 0,042	0,5833	2,7042	251,42	9400	1,0	- 80+ - 30				
	20,5	0	0	0	0,0016	1,6609	3920,8	0,9751	- 6+160				
	30,3 (тв. фаза/solid)	0	0,125	4,9167	7,1375	471,58	14100	1,0	- 80+ - 30				
	30,3	0	0	0	0,0033	2,1245	3765,6	0,9455	- 12+160				
	40,6 (тв. фаза/solid)	0	0	2,28	5,5236	468,62	15900	0,9995	- 80+ - 30				
	40,6	0	0	0	0	3,6944	3529,4	1,0	- 18+160				
	50,9 (тв. фаза/solid)	0	0	3,06	7,133	587,62	19246	0,9994	- 80+ - 35				
	50,9	0	0	0	0	4,5217	3304,2	1,0	- 29+160				
	80,6	0	0	0	0	5,5352	2767,4	1,0	- 34+120				

Таблица 3. Коэффициенты уравнения (2) для расчета теплоемкости ряда водных растворов солей и криопротекторов в зависимости от концентрации при фиксированных температурах; дисперсии аппроксимаций и диапазоны концентраций применения уравнения

Table 3. Coefficients of equation (2) to calculate thermal capacity of some saline aqueous solutions and cryoprotective agents depending on concentration at fixed temperatures, approximation dispersion and temperature ranges of equation application

Вещество Substance		Температура, °C Temperature, °C	$b_4, \times 10^{-5}$	$b_3, \times 10^{-3}$	$b_2, \times 10^{-2}$	b_1	b_0	R^2	Диапазон концентраций C, масс. % Concentration range C, % (w/w)	Источник Reference
Соли Salts	CaCl ₂	15,6	0	0	55,42	-66,184	4185,5	0,9979	0+30	[35]
	NaCl	15	0	47,1	-128,8	-32,878	4185,5	0,9664	5+25	[10,19,47]
		18	0	0	943420	-5106,6	4182,9	0,9978	0+0,13	
		20	0	121,7	-419,62	-7,028	4181,6	0,9903	0+25	
		60	0	54,5	-135,92	-37,82	4184,1	0,99	0+25	
Амиды Amides	Ацетамид Acetamide	25	0	0	0	-14,912	4179,3	0,9991	0+20	[2]
	ДМАц DMAc	25	0	0	-12,74	-8,7384	4179,3	0,9995	0+100	[2]
	ДМФА DMFA	5	0	0	-8,85	-12,155	4201,9	0,9977	0+100	[2,12]
		25	0	0	-10,47	-10,713	4179,3	0,9996	0+100	
		35	0	0	-12,81	-8,4064	4177,9	0,9995	0+100	
		50	0	0	-15,11	-6,0981	4180,4	0,9987	0+100	
	Мочевина Urea	2	0	0	22,6	-33,513	4213,8	0,9997	0+33	[2]
		5	0	0	17,17	-31,377	4201,9	0,9999	0+39	
		10	0	0	11,83	-28,64	4191,9	0,9998	0+39	
		20	0	0	10,26	-27,364	4181,6	1,0	0+45	
		25	0	0	10,27	-26,753	4179,3	0,9999	0+6	
		30	0	0	8,08	-25,864	4178,2	1,0	0+51	
	МФА MFA	25	0	0	-4,66	-16,266	4179,3	0,9983	0+100	[2,12]
		35	0	0	-5,07	-15,556	4177,9	0,9988	0+100	
	ФА FA	25	0	0	4,44	-22,078	4179,3	0,9993	0+100	[2]
Амино-кислоты Amino acids	DL-α-аланин DL-α-alanine	5	0	0	46,84	-33,383	4201,9	0,9884	0+10	[2]
		25	0	0	16,4	-26,763	4179,3	0,9984	0+10	
		40	0	0	21,91	-26,019	4178,3	0,9954	0+10	

Продолжение табл. 3
Table 3. (Continued from the previous page)

Вещество Substance		Температура, °C Temperature, °C	$b_4, \times 10^{-5}$	$b_3, \times 10^{-3}$	$b_2, \times 10^{-2}$	b_1	b_0	R^2	Диапазон концентраций C, масс. % Concentration range C, % (w/w)	Источник Reference
Амино – кислоты Amino acids	Валин Valine	25	0	0	0	-14,753	4179,3	0,991	0÷2,5	[2]
	Глицин Glycine	5	0	0	49,97	-43,588	4201,9	1,0	0÷13	
		25	0	0	26,51	-36,392	4179,3	1,0	0÷19	
		40	0	0	21,25	-33,907	4178,3	1,0	0÷17	
	L-пролин L-proline	25	0	0	0	-26,669	4179,3	0,9997	0÷2	
	DL-серин DL-serine	25	0	0	0	-30,359	4179,3	0,9993	0÷3,6	
Водо – раство – римые полимеры Water soluble polymers	ПВП (м.м.44000) PVP (m.w. 44000)	0	0	4,9	-4,09	-34,211	4217,4	0,9967	0÷40	[59]
	ПВП (м.м.44000) (тв. фаза) PVP (m.w. 44000) (solid phase)	-8	0	26,7	-175	4,8333	3980	1,0	10÷40	
		-13	0	26,7	-175	3,8333	4010	1,0	10÷40	
		-18	0	21,7	-150	-0,1667	4050	1,0	10÷40	
		-23	0	-5	40	-44,5	4410	1,0	10÷40	
		-28	0	-38,3	290	-107,17	4970	1,0	10÷40	
		-33	0	-66,7	500	-160,33	5510	1,0	10÷40	
		-38	0	0	265	-171,5	6260	1,0	10÷40	
Сульф – оксиды Sulfoxides	ДМСО DMSO	25	0	0	-1,45	-20,799	4179,3	0,9993	0÷100	[2]
Спирты Alcohols	Глицерин Glycerol	25	0	0	-1,94	-17,628	4179,3	0,9923	0÷100	[2,18]
	ДЭГ DEG	10	0	0	-3,72	-15,695	4192	0,9995	0÷100	[41]
		37,8	0	0	-6,12	-12,46	4178	0,9995	0÷100	
	Маннит Mannitol	25	0	0	0	-16,933	4179,3	0,9999	0÷15,5	[2]
	Метанол Methanol	0	-2,569	7,097	-64,66	2,834	4217,4	0,9999	0÷100	[2]
		10	-3,348	8,895	-80,32	8,884	4191,9	0,9999	0÷100	
		20	-3,566	9,438	-86,96	12,87	4181,6	1,0	0÷100	
		30	-3,112	8,473	-82,84	14,58	4178,2	0,9999	0÷100	
40		-2,445	7,091	-76,09	15,86	4178,3	0,9999	0÷100		
50		-2,306	6,806	-75,96	18,21	4180,4	0,9997	0÷100		

Продолжение табл. 3
Table 3. (Continued from the previous page)

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	$b_4, \times 10^{-5}$	$b_3, \times 10^{-3}$	$b_2, \times 10^{-2}$	b_1	b_0	R^2	Диапазон концентраций C, масс. % Concentration range C, % (w/w)	Источник Reference	
Спирты Alcohols	Метанол Methanol	60	-2,064	6,214	-73,06	20	4184,1	0,9995	0÷100	[2]
		70	2,049	0,01923	-46,11	19,02	4189,3	0,9984	0÷75	
		80	0	-21,84	58,36	10,74	4196,1	1,0	0÷30	
	ТЭГ TEG	0	0	0	-5,92	-16,186	4217,6	0,9996	0÷100	[55]
		10	0	0	-6,32	-15,114	4207,3	0,9995	0÷100	
		20	0	0	-6,7	-14,079	4199,6	0,9995	0÷100	
		30	0	0	-7,06	-13,082	4194,4	0,9995	0÷100	
		40	0	0	-7,42	-12,124	4191,7	0,9994	0÷100	
	ЭГ EG	50	0	0	-15,17	-7,0036	4180,4	0,9965	0÷46	[2,7,47,56, 60]
		30	0	0	-7,25	-12,425	4178,2	0,9808	0÷100	
		25	0	0	-5,16	-12,832	4179,3	0,9983	0÷100	
		20	0	0	-6,05	-13,605	4181,6	0,9978	0÷90	
		15	0	0	-13,29	-5,342	4185,5	0,9956	0÷60	
		10	0	0	-4,43	-15,721	4190,9	0,9987	0÷90	
		0	0	0	1,25	-18,768	4217,4	0,9973	0÷46	
		-10	0	0	-18,55	-6,9119	4035,4	0,9974	27÷46	
		-15	0	0	-31,31	2,5783	3841,6	0,9964	27÷46	
		-20	0	0	-51,94	20,963	3419,1	0,9926	35÷46	
	Этанол Ethanol	25	-1,997	7,136	-93,84	25,04	4179,3	0,9991	0÷100	[2]
		30	-2,128	7,199	-92,49	24,89	4178,2	0,9992	0÷100	
40		-1,538	5,734	-80,88	23,1	4178,3	0,9994	0÷100		
50		-2,109	6,479	-82,19	23,82	4180,4	0,9983	0÷100		
1,2-ПД (тв. фаза) 1,2-PD (solid phase)	-80	0	0	-18,64	22,063	1536	0,9516	0÷50	[4,56]	
	-70	0	0	-7,12	22,176	1609	0,9608	0÷50		
	-60	0	0	-8,77	30,722	1681	0,9944	0÷50		
	-50	0	0	4,19	40,198	1751	0,9976	0÷50		

Продолжение табл. 3
Table 3. (Continued from the previous page)

Вещество Substance		Температура, °C Temperature, °C	$b_4, \times 10^{-5}$	$b_3, \times 10^{-3}$	$b_2, \times 10^{-2}$	b_1	b_0	R^2	Диапазон концентраций C, масс. % Concentration range C, % (w/w)	Источник Reference	
Спирты Alcohols	1,2-ПА (тв. фаза) 1,2-PD (solid phase)	-30	0	0	-23,2	115,3	1882	0,9934	0+40	[4,56]	
	1,2-ПА 1,2-PD	-10	0	0	-34,08	9,5986	3872	1,0	30+50	[1,56,60,62]	
		0	0	0	-11,16	-8,5927	4217,4	0,9973	0+50		
		10	0	0	-5,74	-13,647	4190,9	0,9924	0+90		
		15	0	0	-13,63	-5,4877	4185,5	0,9988	0+60		
		20	0	0	-6,76	-11,085	4181,6	0,9831	0+100		
		30	0	0	-14,99	-3,7542	4178,1	0,9772	0+50		
		40	0	0	3,15	-24,47	4707	0,9997	30+100		
		50	0	0	2,5	-23,155	4698,8	1,0	30+100		
		60	0	0	2,32	-22,649	4710,7	0,9997	30+100		
		70	0	0	2,26	-22,036	4712,4	0,9997	30+100		
		80	0	0	0,6	-19,536	4666,5	0,9999	30+100		
		90	0	0	0,42	-18,958	4673,7	0,9996	30+100		
	1,3-ПА 1,3-PD	30	0	0	-13,85	-4,6103	4178,2	0,9947	0+100		
Углеводы Carbo- hydrates	Глюкоза Glucose	16	0	0	0	-16,681	4088,8	0,999	4+15	[2]	
		24	0	0	0	-16,824	4116,3	0,9988	4+15		
		32	0	0	0	-16,899	4149,5	0,9987	4+15		
		39	0	0	0	-16,711	4184,9	0,9989	4+15		
		Лактоза Lactose	20	0	0	0	-24,264	4181,6	0,9998	0+20	[2]
	Сахароза Sucrose	0	0	0	0	-25,598	4217,4	0,9995	0+90	[2,48]	
		10	0	0	0	-24,453	4191,9	0,9995	0+90		
		20	0	0	0	-23,451	4181,6	0,9998	0+90		
		25	0	0	0	-22,831	4179,3	0,9999	0+66		
		30	0	0	0	-22,705	4178,2	0,9995	0+90		
40		0	0	0	-21,882	4178,3	0,9996	0+90			
50		0	0	0	-21,267	4180,4	0,9993	0+90			

Продолжение табл. 3
Table 3. (Continued from the previous page)

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	$b_4, \times 10^{-5}$	$b_3, \times 10^{-3}$	$b_2, \times 10^{-2}$	b_1	b_0	R^2	Диапазон концентраций C, масс. % Concentration range C, % (w/w)	Источник Reference
Эфиры Ethers	МЭЭГ (тв. фаза) МЕЕГ (solid phase)	-100	0	0	11,718	2,2547	1279,8	0,9817	10÷50
		-70	0	0	0,53074	6,5351	1246	0,9726	10÷50
		-60	0	0	13,14	7,342	1309,7	0,9985	10÷50
		-50	0	0	16,262	9,8043	1470	0,976	10÷50
		-40	0	0	40,77	5,8584	1818	0,9934	0÷50
		-30	0	0	26,1	39,318	1882	0,9923	0÷50
		-20	0	0	-22,67	121	1943	0,9924	0÷40
МЭЭГ МЕЕГ	20	0	0	-22,572	-5,8015	4181,6	0,9924	0÷50	

Таблица 4. Коэффициенты уравнения (2) для расчета теплоемкости ряда смесей криопротекторов в зависимости от концентрации при фиксированных температурах; дисперсии аппроксимаций и диапазоны концентраций применения уравнения

Table 4. Coefficients of equation (2) to calculate thermal capacity of cryoprotective agents' mixtures depending on concentration at fixed temperatures, approximation dispersion and temperature ranges of equation application

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	$b_3, \times 10^{-5}$	$b_2, \times 10^{-2}$	b_1	b_0	R^2	Диапазон концентраций C, масс. % Concentration range C, % (w/w)	Источник Reference
Ацетамид + ДМФА Acetamide + DMFA	25	0	0	-5,408	2530,5	0,9998	80÷100 ДМФА DMFA	[2]
ДМФА + этанол DMFA + ethanol	-15	0	-1,11	2,0381	2067,2	0,9959	0÷100 этанола ethanol	[15]
	5	0	-0,87	3,3105	2038,4	0,9998		
	25	0	-0,55	4,428	2052,2	1,0		
	45	0	-0,03	5,5176	2078,1	1,0		
Мочевина + ДМФА Urea + DMFA	25	0	0	-10,168	3007,4	0,999	89÷100 ДМФА DMFA	[2]
ДМФА + хлороформ DMFA + chloroform	-15	-60	7,35	-12,665	2072,4	0,9997	0÷100 хлороформа chloroform	[15]
	5	-50	4,85	-11,069	2044,4	0,9994		
	25	-50	5,07	-11,306	2057,6	0,9995		
	45	-50	5,06	-11,469	2083,1	0,9996		
Этанол + глицерин Ethanol + glycerol	25	-3,864	1,688	-1,305	2321	0,8442	10÷100 глицерина glycerol	[2]

Таблица 5. Теплоемкости ряда криопротекторов и их растворов
Table 5. Thermal capacity of some cryoprotective agents and their solutions

Вещество Substance	Концентрация, % масс. Concentration, % (w/w)	Температура, °C Temperature, °C	Теплоемкость, Дж/кг·К Thermal capacity, J/kg·K	Источник Reference
Глицерин Glycerol	50	0	3393,9	[18]
ЭГ EG	60	20	3094	[44]
ЭГ(10% льда) EG (10% of ice)	14,55	-6	42920	[49]
	36,08	-24	10210	
1,2-ПА 1,2-PD	60	20	3161,9	[44]
1,2-ПА (10% льда) 1,2-PD (10% of ice)	15,49	-6	41760	[49]
	38,79	-24	9870	
Этанол Ethanol	80	20	3098	[40]
Этанол (10% льда) Ethanol (10% of ice)	11,59	-6	46100	[40]
	30,46	-24	13680	
Метанол (10% льда) Methanol (10% of ice)	8,22	-6	48280	[49]
	25,8	-24	15090	
ДМСО DMSO	100	25	1966,9	[33,38]
		18,5	1957	[54]
		25	4090	[33]
NaMnO ₄	2,16	-0,4	4186	[32]
NaMnO ₄ (тв. фаза/solid phase)			1950	
NaCl (10% льда/of ice)	8,31	-6	46640	[49]
	22,49	-24	9880	
Раствор Хартмана Hartman's solution	-	20	4153	[28]
α-лактоза α-lactose	100	25	1171,8	[53]
β-лактоза β-lactose	100	25	1104,84	[53]
d-маннит d-mannite	100	25	1383 ± 9	[29]
Агар-гель Agar gel	1	38	4180	[43]
ФА FA	100	20	2737,6	[46]

Литература

1. Анонов А.А., Тепляков В.В., Першин П.М. Формулы зависимости термодинамических свойств воды и водяного пара от температуры для интервала 0–800°C при давлениях 0,01 МПа; 0,1 МПа; 1,0 МПа; 2,0 МПа; 3,0 МПа; 4,0 МПа // Деп. в ВИНТИ N289-87.
2. Белоусов В.П., Морачевский А.Г., Панов М.Ю. Тепловые свойства растворов неэлектролитов: Справочник.– Л.: Химия, 1981.– 264 с.
3. Бидный С.Ю. Изучение теплоемкости и низкотемпературных превращений водных растворов полиолов и их производных: Автореф. дис. ... канд. хим. наук.– Харьков, 1985.– 24 с.
4. Бидный С.Ю., Бронштейн В.Л. Измерение удельной теплоты плавления льда в замороженных растворах полиолов // Деп. в ВИНТИ N5740-85Деп.
5. Бидный С.Ю., Иванова Е.Ф. Температурная зависимость теплоемкости ряда производных глицерина // 5-я Всесоюзная конференция по термодинамике органических соединений. Тез. докладов.– 1985.– С. 80.
6. Бидный С.Ю., Кошций С.В., Гучок В.М., Шраго М.И. Некоторые физико-химические свойства и токсичность водных растворов монохлоргидрина глицерина // Проблемы криобиологии.– 1994.– №2.– С. 21–25.
7. Богданов Н.С., Иванов О.П., Куприянова А.В. Холодильная техника. Свойства веществ: Справочник.– М.: Агропромиздат, 1985.– 208 с.
8. Коверда В.П., Скрипов В.П. О температурной зависимости теплоемкости переохлажденной воды // Журнал физической химии.– 1978.– Т. 52, N4.– С. 1041–1043.
9. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике.– М.: Наука, 1982.– 208 с.
10. Краткий справочник физико-химических величин.– Л.: Химия, 1983.– 232 с.
11. Крестов А.Г., Куликов М.В. Теплоемкость системы N,N-диметилформамид-ацетонитрил // Деп. в ВИНТИ N7702-В89.
12. Куликов М.В., Крестов А.Г., Сафонова Л.П., Колкер А.М. Избыточные термодинамические функции систем вода – N-метилформамид вода – N,N-диметилформамид при 308,15 К // Термодинамика растворов неэлектролитов.– Л.: Химия, 1989.– С. 27–32.
13. Куликов О.В., Козлов В.А., Маленкина Л.И., Баделин В.Г. Теплоемкости аминокислот и пептидов и избыточные характеристики их водных растворов // Термодинамика растворов неэлектролитов.– Л.: Химия, 1989.– С. 36–42.
14. Кухлинг Х. Справочник по физике.– М.: Мир, 1985.– 520 с.
15. Петров А.Н., Пешеходов П.Б., Альпер Г.А. Теплоемкость неводных растворов неэлектролитов на основе N,N-диметилформамида // Термодинамика растворов неэлектролитов.– Л.: Химия, 1989.– С. 21–26.
16. Пушкарь Н.С., Тимошенко Ю.П., Лобынцева Г.С., Щербак Г.В. Современное состояние проблем размораживания органов и тканей // Итоги науки и техники. Серия "Биофизика". Т. 9. Физико-химические механизмы криоповреждений биологических структур.– М.: ВИНТИ, 1978.– С. 8–52.
17. Сморгин Г.И. Особенности кристаллизации неподвижной переохлажденной воды // Материалы Всесоюзного совещания "Проблемы инженерной гляциологии".– Новосибирск, 1986.– С. 16–23.
18. Справочник по физико-техническим основам криогеники / Под ред. М.П. Малкова.– М.: Энергоатомиздат, 1985.– 432 с.
19. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К. Кикоина.– М.: Атомиздат, 1976.– 1008 с.
20. Теплотехнический справочник. Т. 2 / Под ред. В.Н. Юрнева, П.Д. Лебедева.– М.: Энергия, 1976.– 896 с.
21. Тимошенко Ю.П. Исследование процесса теплопереноса при замораживании биологических объектов: Дис. ... канд. техн. наук.– Харьков, 1982.– 148 с.

References

1. Anonov A.A., Teplyakov V.V., Pershin P.M. Dependence formulas of thermodynamical properties of water and aqueous vapor within the range of 0–800°C with 0.01 MPa; 0.1 MPa; 1.0 MPa; 2.0 MPa; 3.0 MPa; 4.0 MPa // Dep.in VINITI N 289-87.
2. Belousov V.P., Morachevsky A.G., Panov M.Yu. Thermal properties of non-electrolyte solutions: Reference book.– Leningrad: Khimiya, 1981.– 264 p.
3. Bidny S.Yu. Studying thermal capacity and low-temperature changes of polyols' aqueous solutions and their derivatives: Author's Abstract of Thesis of Cand. of Chem. Sciences.– Kharkov, 1985.– 24 p.
4. Bidny S.Yu., Bronshtein B.L. Measurement of ice specific heat of fusion in frozen solutions of polyols / Dep. in VINITI N 5740-85.
5. Bidny S.Yu., Ivanova E.F. Temperature dependence of thermal capacity of some glycerol derivatives / 5th All-union conference for thermodynamics of organic compounds. Abstracts.– 1985.– 80 p.
6. Bidny S.Yu., Koschij S.V., Guchok V.M., Shrago M.I. Some physico-chemical properties and toxicity of monochlorohydrine glycerol aqueous solutions// Problems of Cryobiology.– 1994.– N2.– P. 21–25.
7. Bogdanov N.S., Ivanov O.P., Kupriyanova A.V. Refrigerating appliances. Properties of substances. Reference book.– Moscow: Agropromizdat, 1985.– 208 p.
8. Koverda V.P., Skripov V.P. About temperature dependence of thermal capacity of overcooled water // Zhurnal Fizicheskoy Khimii.– 1978.– Vol. 52, N4.– P. 1041–1043.
9. Koshkin N.I., Shirkevich M.G. Reference book on elementary physics.– Moscow: Nauka, 1982.– 208 p.
10. Brief Reference Book of Physical and Chemical Values.– Leningrad: Khimiya, 1983.– 232 p.
11. Krestov A.G., Kulikov M.V. Thermal capacity of N,N-dimethyl formamide - acetonitrile system // Dep. in VINITI N7702-V89.
12. Kulikov M.V., Krestov A.G., Safonova L.P., Kolker A.M. Excessive thermo-dynamical functions of water N-methyl formamide and water-N,N-dimethyl formamide systems at 308.15 K // Thermodynamics of non-electrolytes solutions.– Leningrad: Khimiya, 1989.– P. 27–32.
13. Kulikov M.V., Kozlov V.A., Malenkina L.I., Badelin V.G. Thermal capacities of amino acids and peptides and excessive characteristics of their aqueous solutions/ Thermodynamics of non-electrolytes solutions.– Leningrad: Khimiya, 1989.– P. 36–42.
14. Kuchling H. Reference book on physics.– Moscow: Mir, 1985.– 520 p.
15. Petrov A.N., Peshekhodov P.B., Al'per G.A. Thermal capacity of non-aqueous solutions of non-electrolytes based on N,N-dimethyl formamide // Thermodynamics of non-electrolytes solutions.– Leningrad: Khimiya, 1989.– P. 21–26.
16. Pushkar N.S., Timoshenko Yu.P., Lobyntseva G.S., Scherbak G.V. Actual state of problems of organ and tissue freeze-thawing // Uspekhi Nauki i Tekhniki. Ser. Biophysics. Vol. 9. Physico-chemical mechanisms of cryodamages of biological structures.– 1978.– Vol. 9.– P. 8–52.
17. Smorygin G.I. Peculiarities of crystallization of immobile overcooled water // Proc. of All-Union Meeting 'Problems of engineering glaciology'.– Novosibirsk, 1986.– P. 16–23.
18. Reference Book on Physical and Technical Basics of Cryogenics / Ed. by M.P. Malkova.– Moscow: Energoatomizdat, 1985.– 432 p.
19. Tables of physical values. Reference book / Ed. by I.K. Kikoin.– Moscow: Atomizdat, 1976.– 1008 p.
20. Thermotechnical reference book. Vol. 2 / Ed. by V.N. Yurenev and P.D. Lebedev.– Moscow: Energiya, 1976.– 896 p.
21. Timoshenko Yu.P. Study of heat transfer process during freezing of biologic objects: Thesis of Cand. of Technical Sciences.– Kharkov, 1982.– 148 p.
22. Timoshenko Yu.P. Calorimetric studies of some cryofilactics // Kriobiologiya i Kriomeditsina.– 1975.– Issue 1.– P. 54–56.

22. Тимошенко Ю.П. Калориметрические исследования некоторых криофилактиков // Криобиология и криомедицина.– 1975.– Вып. 1.– С. 54–56.
23. Франкс Ф. Вода и водные растворы при температурах ниже 0°C.– Киев: Наук. думка, 1985.– 388 с.
24. Чижов Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов.– М.: Пищевая промышленность, 1979.– 272 с.
25. Angell C.A., Shuppert J., Tucker J.C. Anomalous properties of supercooled water. Heat capacity, expansivity and proton magnetic resonance chemical shift from 0 to –38°C // J. Phys. Chem.– 1973.– Vol. 77, N26.– P. 3092–3099.
26. Bald W.B. Real cooling and warming rates during cryopreservation // Cryo-Letters.– 1993.– Vol. 14, N4.– P. 207–216.
27. BASF Corporation. The chemical company [Электронный ресурс] // [веб-сайт] www2.basf.us/corporate/index.html (7.01.2011).
28. Blake A.S., Petley G.W., Deakin C.D. Effects of changes in packed cell volume on the specific heat capacity of blood: implications for studies measuring heat exchange in extra-corporeal circuits // Br. J. Anaest.– 2000.– Vol. 84, N1.– P. 28–32.
29. Burger A., Henck J.-O., Hetz S. et al. Energy/temperature diagram and compression behavior of the polymorphs of d-mannitol // J. Pharm. Sci.– 2000.– Vol. 89, N4.– P. 457–468.
30. Carlson H.G., Westrum E.F., Jr. Methanol: heat capacity, enthalpies of transition and melting, and thermodynamic properties from 5–300 K // J. Chem. Phys.– 1971.– Vol. 54, N4.– P. 1464–1471.
31. Celanese chemicals [Электронный ресурс] // [веб-сайт] www.chemvip.com (10.01.2011).
32. Crawford M.F., Diller K.R. Microscopic study of coupled heat and mass transport during unidirectional solidification of binary solutions. I. Thermal analysis // Int. J. Heat Mass Transfer.– 1990.– Vol. 33, N1.– P. 29–38.
33. Diller K.R. The influence of controlled ice nucleation on regulating the thermal history during freezing // Cryobiology.– 1985.– Vol. 22, N3.– P. 268–281.
34. Emons H.H., Naumann R., Jahn K., Flammersheim H.-J. Thermal properties of acetamide in temperature range from 298K to 400 K // Thermochemica Acta.– 1986.– Vol. 104, N1.– P. 127–137.
35. Figura L.O., Teixeira A.A. Food physics. Physical properties – measurement and application.– New York: Springer, 2007.– 550 p.
36. Flick E.W. Industrial solvents handbook.– Westwood: William Andrew, 1998.– 963 p.
37. Freitas R.A. Nanomedicine. Vol.1. Basic Capabilities, Landes Bioscience [Электронный ресурс] // [веб-сайт] http://www.nanomedicine.com/ (13.12.2010).
38. Gaylord Chemical Company LLC. Dimethyl Sulfoxid (DMSO). Physical properties [Электронный ресурс] // [веб-сайт] www.gaylordchemical.com/bulletins (5.01.2011).
39. van Gelder M.F. A thermistor based method for measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of moist food materials at high temperatures: Thesis ... doctor of philosophy.– Blackburg, 1998.– 160 p.
40. Goel M., Roy S.K., Senguptas S. Laminar forced convection heat transfer in microcapsulated phase change material suspensions // Inf. J. Heat Mass Transfer.– 1994.– Vol. 37, N4.– P. 593–604.
41. Huntsman international LLC [Электронный ресурс] // [веб-сайт] www.huntsman.com (10.01.2011).
42. Kaye & Laby Tables of physical and chemical constants. [Электронный ресурс] // [веб-сайт] www.kayelab.npl.co.uk/toc/ (23.12.2010)
43. Kharalkar N.M., Hayes L.J., Valvano J.W. Pulse-power integrated-decay technique for the measurement of thermal conductivity // Meas. Sci. Technol.– 2008.– Vol. 19, N1.– P. 1–10.
44. Franks F. Water and aqueous solutions under the temperatures below 0°C.– Kiev: Naukova Dumka, 1985.– 388 p.
24. Chizhov G.B. Thermophysical processes in refrigeration technology of food products.– Moscow: Food Industry, 1979.– 272 p.
25. Angell C.A., Shuppert J., Tucker J.C. Anomalous properties of supercooled water. Heat capacity, expansivity and proton magnetic resonance chemical shift from 0 to –38°C // J. Phys. Chem.– 1973.– Vol. 77, N26.– P. 3092–3099.
26. Bald W.B. Real cooling and warming rates during cryopreservation // Cryo-Letters.– 1993.– Vol. 14, N4.– P. 207–216.
27. BASF Corporation. The chemical company [Electronic resource] // [web site] www2.basf.us/corporate/index.html (7.01.2011).
28. Blake A.S., Petley G.W., Deakin C.D. Effects of changes in packed cell volume on the specific heat capacity of blood: implications for studies measuring heat exchange in extra-corporeal circuits // Br. J. Anaest.– 2000.– Vol. 84, N1.– P. 28–32.
29. Burger A., Henck J.-O., Hetz S. et al. Energy/temperature diagram and compression behavior of the polymorphs of d-mannitol // J. Pharm. Sci.– 2000.– Vol. 89, N4.– P. 457–468.
30. Carlson H.G., Westrum E.F., Jr. Methanol: heat capacity, enthalpies of transition and melting, and thermodynamic properties from 5–300 K // J. Chem. Phys.– 1971.– Vol. 54, N4.– P. 1464–1471.
31. Celanese chemicals [Electronic resource] // [web site] www.chemvip.com (10.01.2011).
32. Crawford M.F., Diller K.R. Microscopic study of coupled heat and mass transport during unidirectional solidification of binary solutions. I. Thermal analysis // Int. J. Heat Mass Transfer.– 1990.– Vol. 33, N1.– P. 29–38.
33. Diller K.R. The influence of controlled ice nucleation on regulating the thermal history during freezing // Cryobiology.– 1985.– Vol. 22, N3.– P. 268–281.
34. Emons H.H., Naumann R., Jahn K., Flammersheim H.-J. Thermal properties of acetamide in temperature range from 298K to 400 K // Thermochemica Acta.– 1986.– Vol. 104, N1.– P. 127–137.
35. Figura L.O., Teixeira A.A. Food physics. Physical properties – measurement and application.– New York: Springer, 2007.– 550 p.
36. Flick E.W. Industrial solvents handbook.– Westwood: William Andrew, 1998.– 963 p.
37. Freitas R.A. Nanomedicine. Vol.1. Basic Capabilities, Landes Bioscience [Electronic resource] // [web site] http://www.nanomedicine.com/ (13.12.2010).
38. Gaylord Chemical Company LLC. Dimethyl Sulfoxid (DMSO). Physical properties [Electronic resource] // [web site] www.gaylordchemical.com/bulletins (5.01.2011).
39. van Gelder M.F. A thermistor based method for measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of moist food materials at high temperatures: Thesis ... doctor of philosophy.– Blackburg, 1998.– 160 p.
40. Goel M., Roy S.K., Senguptas S. Laminar forced convection heat transfer in microcapsulated phase change material suspensions // Inf. J. Heat Mass Transfer.– 1994.– Vol. 37, N4.– P. 593–604.
41. Huntsman international LLC [Electronic resource] // [web site] www.huntsman.com (10.01.2011).
42. Kaye & Laby Tables of physical and chemical constants. [Electronic resource] / [web site] www.kayelab.npl.co.uk/toc/ (23.12.2010)
43. Kharalkar N.M., Hayes L.J., Valvano J.W. Pulse-power integrated-decay technique for the measurement of thermal conductivity // Meas. Sci. Technol.– 2008.– Vol. 19, N1.– P. 1–10.
44. Kulkarni D.P., Namburu P.K., Das D.K. Comparison of heat transfer rates of different nanofluids on the basis of the Mouromtseff number // Electronics Cooling.– 2007.– Vol. 13, N3.– P. 193–199.

44. Kulkarni D.P., Namburu P.K., Das D.K. Comparison of heat transfer rates of different nanofluids on the basis of the Mourtseff number // *Electronics Cooling*.– 2007.– Vol.13, N3.– P. 193–199.
45. Leyendekkers J.V., Hunter R.J. Thermodynamic properties of water in the subcooled region. II // *J. Chem. Phys.*– 1985.– Vol. 82, N3.– P. 1447–1453.
46. Liu J.-Y., Fan W.-H., Han K.-L. et al. Ultrafast vibrational and thermal relaxation of dye molecules in solutions // *J. Phys. Chem. A*.– 2003.– Vol. 107, N50.– P. 10857–10861.
47. Martinez I. Thermodynamics of solution [Электронный ресурс] // [веб-сайт] <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c07sol/solutions.htm> (24.12.2010).
48. Mathlouthi M. Sucrose: properties and application.– London: Chapman and Hall, 1995.– 294 p.
49. Meewisse J.W., Ferreira C.A.I. Freezing point depression of various ice slurries [Электронный ресурс] // [веб-сайт] <http://www.pe.tudelft.nl/live/binaries/becb72fa-3163-45fc-ade9-30a03cb5e1ee/doc/freezingpoints.pdf> (20.12.2010).
50. Methanex Corporation [Электронный ресурс] / [веб-сайт] www.methanex.com (20.01.2011).
51. NOAA. National oceanic and atmospheric administration [Электронный ресурс] // [веб-сайт] www.noaa.gov (11.01.2011).
52. Radhakrishnan S. Measurement of thermal properties of seafood: Thesis ... Master of Science.– Blackburn, 1997.– 83 p.
53. Ross K.D. Effects of methanol on physical properties of α - and β -lactose // *J. Dairy Sci.*– 1978.– Vol. 61, N2.– P. 152–158.
54. Tahti T. Suspension melt crystallization in tubular and scraped surface heat exchangers: Dissertation ... Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.).– Hameenlinna, 2004.– 114 p.
55. The Dow chemical company [Электронный ресурс] // [веб-сайт] www.dow.com (28.12.2010).
56. The engineering tool box [Электронный ресурс] // [веб-сайт] www.engineeringtoolbox.com (17.01.2011).
57. Tong B., Liu R.-B., Meng Ch.-G. et al. Heat capacities and nonisothermal thermal decomposition reaction kinetics of d-mannitol // *J. Chem. Eng. Data*.– 2010.– Vol. 55.– P. 119–124.
58. Vertucci C.W. Calorimetric studies of the state of water in seed tissues // *Biophys. J.*– 1990.– Vol. 58, N6.– P. 1463–1471.
59. Wakabayashi T., Franks F. Heat capacities of aqueous polyvinylpyrrolidone solutions at subzero temperatures // *Cryo-Letters*.– 1986.– Vol. 7, N6.– P. 361–366.
60. WEBA Technology Corporation [Электронный ресурс] // [веб-сайт] www.webacorp.com (11.12.2010).
61. Yamamuro O., Oguni M., Matsuo T., Suga H. Heat capacity and glass transition of pure and doped cubic ices // *J. Phys. Chem. Solids*.– 1987.– Vol. 48, N10.– P. 935–942.
62. Yang C., Ma P., Tang D., Jin F. Excess molar volume, viscosity and heat capacity for the mixture of 1,2-propane diol-water at different temperatures // *Chinese J. Chem. Eng.*– 2003.– Vol.11, N2.– P. 175–180.
45. Leyendekkers J.V., Hunter R.J. Thermodynamic properties of water in the subcooled region. II // *J. Chem. Phys.*– 1985.– Vol. 82, N3.– P. 1447–1453.
46. Liu J.-Y., Fan W.-H., Han K.-L. et al. Ultrafast vibrational and thermal relaxation of dye molecules in solutions // *J. Phys. Chem. A*.– 2003.– Vol. 107, N50.– P. 10857–10861.
47. Martinez I. Thermodynamics of solution [Electronic resource] // [web site] <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c07sol/solutions.htm> (24.12.2010).
48. Mathlouthi M. Sucrose: properties and application.– London: Chapman and Hall, 1995.– 294 p.
49. Meewisse J.W., Ferreira C.A.I. Freezing point depression of various ice slurries [Electronic resource] // [web site] <http://www.pe.tudelft.nl/live/binaries/becb72fa-3163-45fc-ade9-30a03cb5e1ee/doc/freezingpoints.pdf> (20.12.2010).
50. Methanex Corporation [Electronic resource] / [web site] www.methanex.com (20.01.2011).
51. NOAA. National oceanic and atmospheric administration [Electronic resource] // [web site] www.noaa.gov (11.01.2011).
52. Radhakrishnan S. Measurement of thermal properties of seafood: Thesis ... Master of Science.– Blackburn, 1997.– 83 p.
53. Ross K.D. Effects of methanol on physical properties of α - and β -lactose // *J. Dairy Sci.*– 1978.– Vol. 61, N2.– P. 152–158.
54. Tahti T. Suspension melt crystallization in tubular and scraped surface heat exchangers: Dissertation ... Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.).– Hameenlinna, 2004.– 114 p.
55. The Dow chemical company [Electronic resource] // [web site] www.dow.com (28.12.2010).
56. The engineering tool box [Electronic resource] // [web site] www.engineeringtoolbox.com (17.01.2011).
57. Tong B., Liu R.-B., Meng Ch.-G. et al. Heat capacities and nonisothermal thermal decomposition reaction kinetics of d-mannitol // *J. Chem. Eng. Data*.– 2010.– Vol. 55.– P. 119–124.
58. Vertucci C.W. Calorimetric studies of the state of water in seed tissues // *Biophys. J.*– 1990.– Vol. 58, N6.– P. 1463–1471.
59. Wakabayashi T., Franks F. Heat capacities of aqueous polyvinylpyrrolidone solutions at subzero temperatures // *Cryo-Letters*.– 1986.– Vol. 7, N6.– P. 361–366.
60. WEBA Technology Corporation [Electronic resource] // [web site] www.webacorp.com (11.12.2010).
61. Yamamuro O., Oguni M., Matsuo T., Suga H. Heat capacity and glass transition of pure and doped cubic ices // *J. Phys. Chem. Solids*.– 1987.– Vol. 48, N10.– P. 935–942.
62. Yang C., Ma P., Tang D., Jin F. Excess molar volume, viscosity and heat capacity for the mixture of 1,2-propane diol-water at different temperatures // *Chinese J. Chem. Eng.*– 2003.– Vol.11, N2.– P. 175–180.

Accepted in 02.02.2011

Поступила 02.02.2011
Рецензент Т.П. Линник