

Термофизические свойства криопротекторов.**V. Теплопроводность и температуропроводность ряда криопротекторов и их водных растворов**

UDC 547.42:5362

A.F. TODRIN*, E.V. TIMOFEYeva, E.V. DAVYDOVA

**Thermophysical Properties of Cryoprotective Agents.
V. Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Some
Cryoprotective Agents and Their Aqueous Solutions**

Систематизированы литературные данные по тепло- и температуропроводности воды, чистых криопротекторов и их водных растворов. Построены эмпирические полиномиальные уравнения для расчета тепло- и температуропроводности воды, чистых криопротекторов и их водных растворов в зависимости от температуры. Для водных растворов некоторых криопротекторов получены эмпирические полиномиальные уравнения в зависимости от температуры при фиксированных концентрациях или от концентрации при фиксированных температурах.

Ключевые слова: криопротектор, теплопроводность, температуропроводность, эмпирические полиномиальные уравнения.

Систематизовано літературні дані по тепло- і температуропровідності води, чистих криопротекторів та їх водних розчинів. Побудовано емпіричні поліноміальні рівняння для розрахунку тепло- і температуропровідності води, чистих криопротекторів і їх водних розчинів в залежності від температури. Для водних розчинів криопротекторів отримано емпіричні поліноміальні рівняння в залежності від температури при фіксованих концентраціях або від концентрації при фіксованих температурах.

Ключові слова: криопротектор, теплопровідність, температуропровідність, емпіричні поліноміальні рівняння.

The literature data for thermal conductivity and thermal diffusivity values of water, pure cryoprotective agents and their aqueous solutions are summarized. The empirical polynomial equations for calculation of thermal conductivity and thermal diffusivity of water, pure cryoprotective agents and their aqueous solutions depending on temperature are derived. The empirical polynomial equations for aqueous solutions of some cryoprotective agents depending on temperature under fixed concentrations or concentration under fixed temperatures are derived.

Key words: cryoprotective agent, thermal conductivity, thermal diffusivity, empirical polynomial equations.

Важная роль тепло- и температуропроводности воды, криопротекторов и их водных растворов в процессе криоконсервирования не вызывает сомнений, поскольку от их величин зависит скорость передачи тепла при охлаждении и нагреве образцов. Температура и состав образца (например, концентрация криопротектора) влияют на величины его тепло- и температуропроводности, особенно при фазовом переходе. Например, тепло- и температуропроводность льда значительно выше, чем воды. При переохлаждении воды (рисунок) и водных растворов криопротекторов наблюдается существенное увеличение теплопроводности по сравнению с ее значениями в зоне положительных температур.

Однако в доступной литературе отсутствуют систематизированные данные по тепло- и температуропроводности для криопротекторов, представлены только отдельные их значения. Накопление

The importance of thermal conductivity and thermal diffusivity of water, cryoprotective agents and their aqueous solutions during cryopreservation is of no doubt, whereas a heat transfer rate during cooling and warming of samples depends on their values. Temperature and composition of the sample (e.g. cryoprotectant concentration) affect the values of its thermal conductivity and thermal diffusivity, especially during phase transfer. For example, thermal conductivity and thermal diffusivity of ice are significantly higher, than the values of water. The significant increase of thermal conductivity during cooling of water (Figure) and aqueous solutions of cryoprotectants if compared with its values within the range of positive temperatures is observed.

However, in available literature the summarized data for thermal conductivity and thermal diffusivity for cryoprotectants are absent, just their single values are presented. Accumulation and analysis of corresponding expe-

Институт проблем криобиологии и криомедицины
НАН Украины, г. Харьков

* 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

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

* 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

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

тепло- и температуропроводности чистых криопротекторов и их водных растворов в зависимости от массовой концентрации криопротектора и температуры.

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

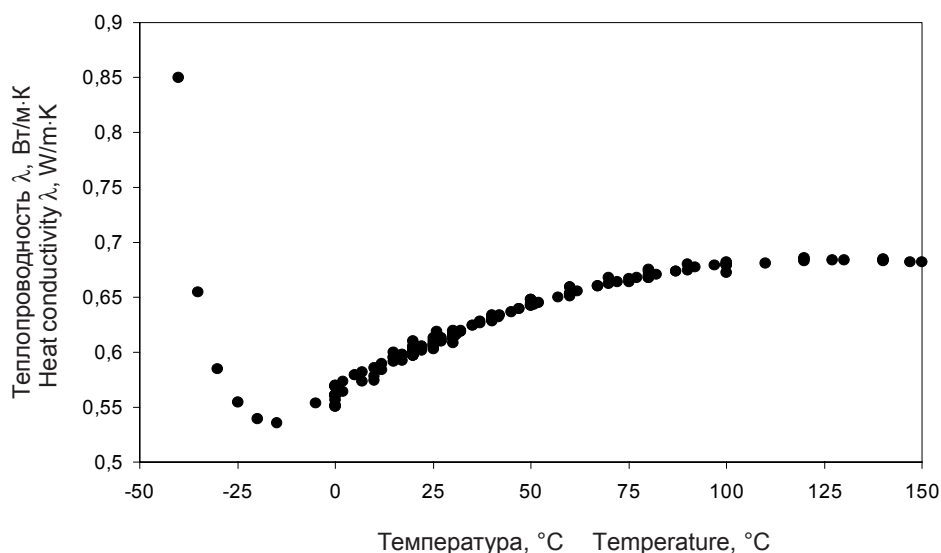
Значения теплопроводности воды в зависимости от температуры приведены в [4, 7, 8, 17, 21, 26, 33, 39, 42, 52, 75, 76, 92, 93]. Полученная зависимость теплопроводности воды от температуры (рисунок), может быть разбита на две части (зона положительных температур и зона переохлаждения), каждая из которых хорошо описывается полиномиальными уравнениями относительно температуры.

Для воды при положительных температурах эмпирическое уравнение для расчета теплопроводности имеет вид:

$$\lambda = -8,3279 \times 10^{-6} t^2 + 2,0178 \times 10^{-3} t + 0,5629,$$

где λ – теплопроводность, Вт/м·К; t – температура, °С. Это уравнение позволяет рассчитать теплопроводность воды в диапазоне температур 0...150°С при дисперсии аппроксимации $R^2 = 0,9904$.

Для переохлажденной воды в интервале температур -40...0°С теплопроводность может быть рассчитана по формуле (при $R^2 = 0,9989$):



Зависимость теплопроводности воды от температуры
Temperature dependence of water thermal conductivity

риментального материала и его суммирование позволят более продуктивно использовать криозащитные свойства, существенно влияющие на природу и кинетику кристаллизационных процессов в биообъектах при их замораживании и отогреве.

The aim of this paper is to summarize and systematize the literature data on the base of deriving empirical equations to calculate the values of thermal conductivity and thermal diffusivity of pure cryoprotective agents and their aqueous solutions depending on cryoprotectant mass concentration and temperature.

The experimental data found in the reports for thermal conductivity and thermal diffusivity of cryoprotective agents and their aqueous solutions were processed with MS Excel 2003 software. We also processed the experimental literature data for water, ice and some aqueous solutions of substances, being absolutely essential both for human vital activity and cryobiology.

The values of thermal conductivity and thermal diffusivity of water depending on temperature are presented in literature references [4, 7, 8, 17, 21, 26, 33, 39, 42, 52, 75, 76, 92, 93]. The obtained temperature dependence of water thermal conductivity (Figure) has two parts (zone of positive temperatures and overcooling one), each of them is well described with polynomials in respect of temperature. For water at positive temperatures the empirical equation for thermal conductivity calculation is as follows:

$$\lambda = -8.3279 \times 10^{-6} t^2 + 2.0178 \times 10^{-3} t + 0.5629,$$

where λ – thermal conductivity, W/m·K; t – temperature, °C.

This equation enables to calculate water thermal conductivity within the range of temperatures from 0 to 150°С at approximation dispersion of $R^2 = 0.9904$.

$$\lambda = -3,957 \times 10^{-8} t^5 - 3,2094 \times 10^{-6} t^4 - 9,5003 \times 10^{-5} t^3 - 1,0482 \times 10^{-3} t^2 - 1,1432 \times 10^{-3} t + 0,565.$$

В табл. 1–3 приведены уравнения для расчета теплопроводности криопротекторов и других веществ, находящихся как в жидком состоянии, так и замороженном (тв. ф.).

Кроме полиномиальных уравнений, в таблицах представлены дисперсии аппроксимации R^2 , диапазоны применения уравнений (температура или концентрация) и источники литературы, из которых взяты экспериментальные данные. Диапазон применения уравнений показывает, при каких температурах или при каких концентрациях были получены экспериментальные данные, приведенные в литературных источниках.

В таблицах приняты следующие условные обозначения:

БД – бутандиол;
 ДМАц – диметилацетамид;
 ДМСО – диметилсульфоксид;
 ДМФА – диметилформамид;
 ДЭГ – диэтиленгликоль;
 ПД – пропандиол;
 ПЭО – полиэтиленоксид;
 ТЭГ – триэтиленгликоль;
 ФА – формамид;
 ЭГ – этиленгликоль.

Данных по температуропроводности различных криопротекторов и их водных растворов в литературе приведено очень мало. Однако ее можно рассчитать по формуле:

$$a = \frac{\lambda}{C_p \rho},$$

где a – температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$; λ – теплопроводность вещества, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$; C_p – его теплоемкость, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$; ρ – плотность вещества, $\text{кг}/\text{м}^3$. Данные по теплопроводности ряда криопротекторов и их водных растворов приведены в табл. 1–3, а по теплоемкости и плотности – в [24, 25].

В табл. 4–6 приведены уравнения для расчета температуропроводности воды, ряда криопротекторов, солей и их растворов.

В табл. 7 приведены усредненные литературные данные по температуропроводности льда, ряда криопротекторов и их водных растворов при различных температурах.

For overcooled water within the $-40 \dots 0^\circ\text{C}$ interval heat conductivity is calculated with the formula (at $R^2 = 0.9989$):

$$\lambda = -3.957 \times 10^{-8} t^5 - 3.2094 \times 10^{-6} t^4 - 9.5003 \times 10^{-5} t^3 - 1.0482 \times 10^{-3} t^2 - 1.1432 \times 10^{-3} t + 0.565.$$

Tables 1–3 represent the equations for calculation of thermal conductivity of cryoprotective agents and other substances, being both in liquid and frozen states (solid phase).

Besides the polynomial equations the Tables represent the approximation dispersion R^2 , application range of equations (temperature or concentration) and literature references from which the experimental data are derived. The application range of equations shows under which temperatures and concentrations the experimental data, presented in the papers were obtained.

The following abbreviations are used in the Tables:

BD – butane diol;
 DMAc – dimethyl acetamide;
 DMSO – dimethyl sulfoxide;
 DMFA – dimethyl formamide;
 DEG – diethylene glycol;
 PD – propane diol;
 PEO – polyethylene oxide;
 TEG – triethylene glycol;
 FA – formamide;
 EG – ethylene glycol.

The data for thermal diffusivity of different cryoprotective agents and their aqueous solutions in the literature are poorly presented. However, it can be calculated with the formula:

$$a = \frac{\lambda}{C_p \rho},$$

where a – thermal diffusivity, m^2/sec ; λ – thermal conductivity of substance, $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$; C_p – heat capacity, $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$; ρ – density of substance, kg/m^3 .

The data for thermal conductivity of some cryoprotective agents and their aqueous solutions are shown in Tables 1–3 and the ones for heat capacity and density are given in our previous articles [24, 25].

In the Tables 4–6 there are presented the equations for calculation of thermal diffusivity of water, some cryoprotective agents, salts and their solutions.

The Table 7 presents the averaged literature data for thermal diffusivity of ice, some cryoprotective agents and their aqueous solutions under different temperatures.

Таблица 1. Уравнения для расчета теплопроводности льда и ряда чистых криопротекторов в зависимости от температуры; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнения
Table 1. Equations to calculate thermal conductivity of ice and some pure cryoprotective agents depending on temperature, approximation dispersions and temperature ranges of equation application

Вещество Substance	Формула Equation	R2	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник Reference		
Лед Ice	$\lambda = -8,3631 \times 10^{-7}t^3 - 7,3293 \times 10^{-5}t^2 - 1,3049 \times 10^{-2}t + 2,18$	0,9831	-170÷0	[7,8,18,28,61,73-75,79]		
Спирты Alcohols	Глицерин Glycerol	$\lambda = 1,381 \times 10^{-4}t + 0,281$	0,9127	0÷155	[3,4,13,14,18-20,26,27,41,52,55,84,90,93]	
	ДЭГ DEG	$\lambda = -6,055 \times 10^{-4}t + 0,2612$	1,0	5÷100	[44]	
		$\lambda = 6,913 \times 10^{-5}t + 0,204$	0,9038	-7÷150	[4,14,72]	
	Метанол Methanol	$\lambda = 3,7464 \times 10^{-7}t^2 - 3,1711 \times 10^{-4}t + 0,2106$	0,9614	-100÷150	[3,4,11,55,83]	
	ТЭГ TEG	$\lambda = -5,484 \times 10^{-4}t + 0,2445$	1,0	5÷100	[44]	
		$\lambda = -2,044 \times 10^{-5}t + 0,1969$	0,9186	-7÷150	[4,14]	
	ЭГ EG	$\lambda = 1,443 \times 10^{-4}t + 0,2517$	0,9142	-20÷150	[5,13,14,26,48,52,84]	
		$\lambda = -7,367 \times 10^{-4}t + 0,2991$	0,9591	10÷150	[44,72]	
	Этанол Ethanol	$\lambda = -0,00028t + 0,1749$	0,9245	-100÷150	[3,4,8,11,45,59,93]	
	1,2-ПД 1,2-PD	$\lambda = -3,764 \times 10^{-5}t + 0,2017$	0,9238	-25÷130	[10,65,78,82,83]	
		$\lambda = -2,89 \times 10^{-5}t + 0,1167$	0,9461	4÷150	[4,44]	
	1,4-БД 1,4-BD	$\lambda = -4,4019 \times 10^{-5}t + 0,2113$	0,9992	30÷100	[38]	
	Амиды Amides	ДМАц DMAc	$\lambda = -0,0004t + 0,1798$	0,9299	15÷90	[4,72,81]
		ДМФА DMFA	$\lambda = -0,000235t + 0,1916$	0,9262	5÷140	[4,43,64,71]
ФА FA		$\lambda = 7,482 \times 10^{-7}t^2 - 2,474 \times 10^{-4}t + 0,361$	0,8672	30÷150	[4,64]	
Водорастворимые полимеры Water-soluble polymers	ПЭО-400 (тв. ф.) PEO-400 (solid phase)	$\lambda = -5,2301 \times 10^{-6}t^2 - 1,8001 \times 10^{-4}t + 0,4363$	0,9955	-160÷-10	[23]	
Углеводы Carbohydrates	Сахароза Sucrose	$\lambda = -7,371 \times 10^{-5}t + 0,2418$	0,9996	0÷50	[32]	
	Фруктоза Fructose	$\lambda = 3,6 \times 10^{-4}t + 0,2371$	1,0	0÷50	[69]	

Таблица 2. Уравнения для расчета теплопроводности ряда водных растворов солей и криопротекторов в зависимости от концентрации при фиксированных температурах; дисперсии аппроксимаций и диапазоны концентраций применения уравнения

Table 2. Equations to calculate thermal conductivity of some aqueous solutions of salts and cryoprotective agents depending on concentrations under fixed temperatures, approximation dispersions and concentration ranges of equation application

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	Формула Equation	R ²	Диапазон концентраций, масс. % Concentration range, W/W %	Источник Reference	
Спирты Alcohols	Глицерин Glycerol	10	$\lambda = 9,528 \times 10^{-6} C^2 - 3,958 \times 10^{-3} C + 0,581$	0,9991	0+100	[5,22,56,82]
		20	$\lambda = 1,176 \times 10^{-5} C^2 - 4,394 \times 10^{-3} C + 0,6$	0,9966	0+100	
		30	$\lambda = 1,129 \times 10^{-5} C^2 - 4,477 \times 10^{-3} C + 0,614$	0,9988	0+100	
		40	$\lambda = 1,214 \times 10^{-5} C^2 - 4,739 \times 10^{-3} C + 0,6305$	0,9988	0+100	
		50	$\lambda = 1,279 \times 10^{-5} C^2 - 4,961 \times 10^{-3} C + 0,646$	0,9988	0+100	
		60	$\lambda = 1,07 \times 10^{-5} C^2 - 4,861 \times 10^{-3} C + 0,6532$	0,9979	0+100	
		70	$\lambda = 9,625 \times 10^{-6} C^2 - 4,869 \times 10^{-3} C + 0,6624$	0,9968	0+100	
		80	$\lambda = 7,24 \times 10^{-6} C^2 - 4,722 \times 10^{-3} C + 0,6687$	0,9935	0+100	
	ДЭГ DEG	0	$\lambda = 3,295 \times 10^{-6} C^2 - 3,417 \times 10^{-3} C + 0,565$	0,9972	0+100	[5,30,66]
		10	$\lambda = 5,925 \times 10^{-6} C^2 - 3,893 \times 10^{-3} C + 0,581$	0,998	0+100	
		20	$\lambda = 9,458 \times 10^{-6} C^2 - 4,482 \times 10^{-3} C + 0,6$	0,999	0+100	
		30	$\lambda = 1,149 \times 10^{-5} C^2 - 4,881 \times 10^{-3} C + 0,614$	0,9989	0+100	
		40	$\lambda = 1,427 \times 10^{-5} C^2 - 5,376 \times 10^{-3} C + 0,6305$	0,999	0+100	
		50	$\lambda = 1,674 \times 10^{-5} C^2 - 5,832 \times 10^{-3} C + 0,646$	0,9989	0+100	
	Метанол Methanol	10	$\lambda = 1,512 \times 10^{-5} C^2 - 5,08 \times 10^{-3} C + 0,581$	0,9995	0+100	[34,51]
		40	$\lambda = 1,986 \times 10^{-5} C^2 - 6,277 \times 10^{-3} C + 0,6305$	0,9997	0+100	
		70	$\lambda = 1,938 \times 10^{-5} C^2 - 6,818 \times 10^{-3} C + 0,6624$	0,9985	0+100	
	ТЭГ TEG	0	$\lambda = 1,589 \times 10^{-7} C^3 - 2,05 \times 10^{-5} C^2 - 2,736 \times 10^{-3} C + 0,565$	0,9997	0+100	[5,30,82]
		10	$\lambda = 1,465 \times 10^{-7} C^3 - 1,711 \times 10^{-5} C^2 - 3,173 \times 10^{-3} C + 0,581$	0,9995	0+100	
		20	$\lambda = 1,12 \times 10^{-7} C^3 - 9,741 \times 10^{-6} C^2 - 3,82 \times 10^{-3} C + 0,6$	0,9983	0+100	
		30	$\lambda = 1,143 \times 10^{-7} C^3 - 9,009 \times 10^{-6} C^2 - 4,117 \times 10^{-3} C + 0,614$	0,9969	0+100	
40		$\lambda = 9,822 \times 10^{-8} C^3 - 4,958 \times 10^{-6} C^2 - 4,59 \times 10^{-3} C + 0,6305$	0,9949	0+100		
50		$\lambda = 8,949 \times 10^{-8} C^3 - 2,235 \times 10^{-6} C^2 - 4,992 \times 10^{-3} C + 0,646$	0,9927	0+100		

Продолжение таблицы 2
Table 2 (continued)

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	Формула Equation	R ²	Диапазон концентраций, масс. % Concentration range, W/W %	Источник Reference	
Спирты Alcohols	ЭГ EG	-10	$\lambda = 2,92 \times 10^{-6} C^2 - 2,602 \times 10^{-3} C + 0,54$	0,9933	0+100	[1,5,7,30,65, 66,89]
		0	$\lambda = 7,244 \times 10^{-6} C^2 - 3,337 \times 10^{-3} C + 0,565$	0,9961	0+100	
		10	$\lambda = 1,202 \times 10^{-5} C^2 - 4,214 \times 10^{-3} C + 0,581$	0,9712	0+100	
		15	$\lambda = 9,477 \times 10^{-6} C^2 - 3,984 \times 10^{-3} C + 0,595$	0,9902	0+100	
		20	$\lambda = 1,265 \times 10^{-5} C^2 - 4,501 \times 10^{-3} C + 0,6$	0,9849	0+100	
		50	$\lambda = 1,699 \times 10^{-5} C^2 - 5,48 \times 10^{-3} C + 0,646$	0,9977	0+100	
Водораствори- мые полимеры Water-soluble polymers	ПЭО-400	20	$\lambda = -2,901 \times 10^{-3} C + 0,4633$	0,9985	10+80	[22]
Углеводы Carbohydrates	Сахароза Sucrose	0	$\lambda = 7,965 \times 10^{-8} C^3 - 1,768 \times 10^{-5} C^2 - 2,249 \times 10^{-3} C + 0,565$	0,9997	0+100	[68,69,84, 91]
		10	$\lambda = 6,195 \times 10^{-8} C^3 - 1,567 \times 10^{-5} C^2 - 2,443 \times 10^{-3} C + 0,581$	0,9998	0+100	
		20	$\lambda = -5,402 \times 10^{-8} C^3 + 2,123 \times 10^{-6} C^2 - 3,28 \times 10^{-3} C + 0,6004$	0,9988	0+100	
		30	$\lambda = 1,917 \times 10^{-8} C^3 - 1,034 \times 10^{-5} C^2 - 2,899 \times 10^{-3} C + 0,614$	1,0	0+100	
		40	$\lambda = -2,212 \times 10^{-8} C^3 - 7,671 \times 10^{-6} C^2 - 3,127 \times 10^{-3} C + 0,6305$	1,0	0+100	
		50	$\lambda = -1,622 \times 10^{-8} C^3 - 6,331 \times 10^{-6} C^2 - 3,286 \times 10^{-3} C + 0,646$	1,0	0+100	
	Фруктоза Fructose	0	$\lambda = -3,379 \times 10^{-6} C^2 - 2,964 \times 10^{-3} C + 0,565$	0,9985	0+100	[69]
		10	$\lambda = -3,994 \times 10^{-6} C^2 - 3,021 \times 10^{-3} C + 0,581$	0,9979	0+100	
		20	$\lambda = -3,705 \times 10^{-6} C^2 - 3,192 \times 10^{-3} C + 0,6$	0,998	0+100	
		30	$\lambda = -4,922 \times 10^{-6} C^2 - 3,173 \times 10^{-3} C + 0,614$	0,9967	0+100	
		40	$\lambda = -5,387 \times 10^{-6} C^2 - 3,249 \times 10^{-3} C + 0,6305$	1,0	0+100	
		50	$\lambda = -6,152 \times 10^{-6} C^2 - 3,288 \times 10^{-3} C + 0,646$	1,0	0+100	
Соли Salts	CaCl ₂	20	$\lambda = -0,0013 C + 0,6$	0,9975	0+40	[2]
		20	$\lambda = -0,002 C + 0,6$	0,9991	0+20	[2]
	NaCl	15	$\lambda = -5,486 \times 10^{-3} C + 0,5886$	0,9974	0+25	[2,10,12,54, 65,70]
		20	$\lambda = -0,0011 C + 0,6$	0,9991	0+20	
Сульфоксиды Sulfoxides	ДМСО DMSO	25	$\lambda = 4,261 \times 10^{-6} C^3 - 7,296 \times 10^{-4} C^2 + 2,824 \times 10^{-2} C + 0,4143$	0,9979	40+100	[71]
		-20	$\lambda = 2,564 \times 10^{-5} C^2 - 6,386 \times 10^{-3} C + 0,5822$	1,0	50+100	[46]

Таблица 3. Уравнения для расчета теплопроводности ряда водных растворов солей и криопротекторов в зависимости от температуры при фиксированных концентрациях; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнения

Table 3. Equations to calculate thermal conductivity of some aqueous solutions of salts and cryoprotective agents depending on temperature under fixed concentrations, approximation dispersions and temperature ranges of equation application

Вещество Substance	Концентрация, масс. % Concentration, % w/w	Формула Equation	R ²	Диапазон температур, ^о С Temperature range, ^о С	Источник Reference	
Спирты Alcohols	ДЭГ DEG	25	$\lambda = -1,043 \times 10^{-5}t^2 + 1,713 \times 10^{-3}t + 0,2495$	0,9983	29+38	[30,66]
		50	$\lambda = -8,644 \times 10^{-5}t^2 + 9,027 \times 10^{-3}t + 0,03987$	0,9997	30+38	
		75	$\lambda = 4,888 \times 10^{-4}t^2 - 3,224 \times 10^{-2}t + 0,7243$	0,9971	28+38	
	Метанол Methanol	25	$\lambda = -7,172 \times 10^{-6}t^2 + 1,877 \times 10^{-3}t + 0,401$	0,9984	32+55	[34,51]
		50	$\lambda = 7,367 \times 10^{-6}t^2 - 4,561 \times 10^{-6}t + 0,3359$	0,999	31+55	
		75	$\lambda = 3,032 \times 10^{-6}t^2 - 6,769 \times 10^{-6}t + 0,2588$	0,9648	30+55	
	ТЭГ TEG	20	$\lambda = 0,0002t^2 - 0,0124t + 0,4305$	0,984	29+37	[30,82]
		50	$\lambda = -3,131 \times 10^{-5}t^2 + 3,587 \times 10^{-3}t + 0,1374$	0,9248	29+39	
		75	$\lambda = 0,00012t^2 - 0,00637t + 0,27177$	0,9623	28+38	
	ЭГ EG	11	$\lambda = -8,329 \times 10^{-6}t^2 + 1,855 \times 10^{-3}t + 0,5106$	0,9996	-1+121	[1,7,30,47, 62,66,89]
		21,8	$\lambda = -6,81 \times 10^{-6}t^2 + 1,528 \times 10^{-3}t + 0,4695$	0,985	-10+121	
		32,4	$\lambda = -5,933 \times 10^{-6}t^2 + 1,333 \times 10^{-3}t + 0,4289$	0,9998	-12+121	
		36,5	$\lambda = -5,06 \times 10^{-7}t^2 + 1,887 \times 10^{-4}t + 0,4661$	0,9979	-20+100	
		42,7	$\lambda = -4,729 \times 10^{-6}t^2 + 1,1 \times 10^{-3}t + 0,3946$	0,9996	-17+121	
		52,8	$\lambda = -3,825 \times 10^{-6}t^2 + 9,006 \times 10^{-4}t + 0,3637$	0,9996	-28+121	
		54,7	$\lambda = -0,0002t + 0,4061$	0,992	-40+100	
	Этанол Ethanol	25	$\lambda = 4,233 \times 10^{-6}t^2 + 8,187 \times 10^{-4}t + 0,4086$	0,9984	28+60	[34,53]
		50	$\lambda = -1,84 \times 10^{-6}t^2 + 6,187 \times 10^{-4}t + 0,2956$	0,9962	29+66	
		75	$\lambda = 2,514 \times 10^{-7}t^2 + 7,378 \times 10^{-5}t + 0,2251$	0,8297	27+60	
	1,2-ПА 1,2-PD	10,3	$\lambda = -8,477 \times 10^{-6}t^2 + 1,837 \times 10^{-3}t + 0,509$	0,9996	-1+162	[7,47,89]
		20,6	$\lambda = -7,102 \times 10^{-6}t^2 + 1,506 \times 10^{-3}t + 0,4641$	0,9994	-6+162	
25,7		$\lambda = 1,779 \times 10^{-6}t^2 + 4,623 \times 10^{-4}t + 0,4698$	0,9984	-10+100		
30,8		$\lambda = -5,954 \times 10^{-6}t^2 + 1,222 \times 10^{-3}t + 0,4222$	0,9996	-12+162		
38,9		$\lambda = 0,0002t + 0,4246$	0,9989	-20+100		
40,9		$\lambda = -4,834 \times 10^{-6}t^2 + 9,54 \times 10^{-4}t + 0,3843$	0,9993	-17+162		
47,9		$\lambda = 5,265 \times 10^{-6}t^2 - 5,412 \times 10^{-5}t + 0,395$	0,9901	-30+100		
50,9		$\lambda = -3,854 \times 10^{-6}t^2 + 7,119 \times 10^{-4}t + 0,3942$	0,9989	-28+162		

Продолжение таблицы 3

Table 3 (continued)

Вещество Substance		Концентрация, масс. % Concentration, % w/w	Формула Equation	R ²	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник Reference
Спирты Alcohols	1,2-ПА 1,2-PD	80,6	$\lambda = -1,431 \times 10^{-6}t^2 + 9,155 \times 10^{-5}t + 0,2594$	0,9663	-34+115	[7,47,89]
	1,4-БД 1,4-BD	50	$\lambda = -9,229 \times 10^{-7}t^2 + 4,611 \times 10^{-4}t + 0,3504$	0,9938	20+150	[38]
Соли Salts	NaCl	15	$\lambda = -5,251 \times 10^{-6}t^2 + 1,821 \times 10^{-3}t + 0,5492$	0,9998	1+45	[10,16,33, 54,80]
	CaCl ₂	29,9	$\lambda = -1,527 \times 10^{-6}t^2 + 1,341 \times 10^{-3}t + 0,471$	0,9998	-50+50	[26]
Углеводы Carbohydrates	Глюкоза Glucose	38,3	$\lambda = -0,0011t^2 - 0,0638t + 0,0324$	1	-20+ -9	[67,68]
Сульфоксиды Sulfoxides	ДМСО DMSO	10	$\lambda = 0,0015t + 0,5276$	1	0+20	[36]
	ДМСО (тв. фаза) DMSO (solid phase)	10	$\lambda = -3,367 \times 10^{-6}t^4 - 3,32 \times 10^{-4}t^3 - 1,153 \times 10^{-2}t^2 - 1,784 \times 10^{-1}t + 1,088$	0,9847	-40+ -2	

Таблица 4. Уравнения для расчета температуропроводности воды и ряда чистых криопротекторов в зависимости от температуры; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнения

Table 4. Equations to calculate thermal diffusivity of water and some pure cryoprotective agents depending on temperature, approximation dispersions and temperature ranges of equation application

Вещество Substance	Формула Equation	R ²	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник Reference
Вода Water	$a = (8,065 \times 10^{-6}t^3 - 3,7338 \times 10^{-3}t^2 + 6,57 \times 10^{-3}t + 1,314) \times 10^{-7}$	0,9907	-40+150	[6,15,17,21,26,29,39, 41,52,63,76,88,93]
Лед Ice	$a = (0,101t + 8,43) \times 10^{-7}$	0,99	-100+0	[57,58,65]
Глицерин Glycerol	$a = (-7,323 \times 10^{-9}t^3 + 9,487 \times 10^{-6}t^2 - 1,669 \times 10^{-3}t + 0,988) \times 10^{-7}$	0,9495	0+150	[1,26,49,52,55,57,76, 93]
Метанол Methanol	$a = (-0,003t + 1,098) \times 10^{-7}$	0,9787	-15+110	[49,57,63,85]
ЭГ EG	$a = (-5,3303 \times 10^{-6}t^2 + 2,7144 \times 10^{-4}t + 0,9348) \times 10^{-7}$	0,9957	-5+130	[1,26,52,55,88]

Таблица 5. Уравнения для расчета температуропроводности ряда водных растворов криопротекторов в зависимости от концентрации при фиксированных температурах; дисперсии аппроксимаций и диапазоны концентраций применения уравнения

Table 5. Equations to calculate thermal diffusivity of some aqueous solutions of cryoprotective agents depending on concentration under fixed temperatures, approximation dispersions and concentration ranges of equation application

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	Формула Equation	R ²	Диапазон концентраций, масс. % Concentration range, % w/w	Источник Reference
Глицерин Glycerol	20	$a = (3,1366 \times 10^{-5}C^2 - 7,9118 \times 10^{-3}C + 1,43) \times 10^{-7}$	0,9704	0+100	[63]
	30	$a = (3,2997 \times 10^{-5}C^2 - 8,727 \times 10^{-3}C + 1,48) \times 10^{-7}$	0,9742	0+100	
	40	$a = (4,6079 \times 10^{-5}C^2 - 1,0511 \times 10^{-2}C + 1,519) \times 10^{-7}$	0,997	0+100	
	50	$a = (4,837 \times 10^{-5}C^2 - 1,1285 \times 10^{-2}C + 1,556) \times 10^{-7}$	0,9977	0+100	
Сахароза Sucrose	23	$a = (-0,0082C + 1,44) \times 10^{-7}$	0,9946	0+50	[35]

Таблица 6. Уравнения для расчета температуропроводности ряда водных растворов солей и криопротекторов в зависимости от температуры при фиксированных концентрациях; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнения

Table 6. Equations to calculate thermal diffusivity of some aqueous solutions of salts and cryoprotective agents depending on temperature under fixed concentrations, approximation dispersions and temperature ranges of equation application

Вещество Substance	Концентрация, масс. % Concentration, % w/w	Формула Equation	R ²	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник Reference
ДМСО DMSO	10	$\alpha = (0,0039C + 1,2855) \times 10^{-7}$	0,9984	0+20	[36]
	10 (тв.ф./solid)	$\alpha = (-9,2079 \times 10^{-5}t^3 - 1,3406 \times 10^{-2}t^2 - 0,712t - 1,5541) \times 10^{-7}$	0,9984	-40+ -2	
CaCl ₂	29,9	$\alpha = (-6,1305 \times 10^{-6}t^2 + 3,0564 \times 10^{-3}t + 1,3323) \times 10^{-7}$	0,9998	-50+50	[26]

Таблица 7. Температуропроводность отдельных веществ и их растворов
Table 7. Thermal diffusivity of some substances and their solutions

Вещество Substance	Концентрация, масс. % Concentration, % w/w	Температура, °C Temperature, °C	$\alpha, \times 10^{-7}, \text{m}^2/\text{c}$ $\alpha, \times 10^{-7}, \text{m}^2/\text{s}$	Источник Reference
Этанол Ethanol	100	20	0,9581	[31,49,50,57,64,93]
		22	0,947	[40]
		25	0,878	[87]
Метанол Methanol	0,5	25	1,438 ± 0,002	[37]
	1	25	1,425 ± 0,004	
Глицерин Glycerol	80	20	0,782	[92]
	50	20	1,04	
ДМСО DMSO	100	25	0,93	[48]
	15,6	25	1,53	
ФА FA	100	20	1,02	[64]
ДМФА DMFA	100	20	0,78	[64]
Агаровый гель Agar gel	—	22,5	1,459	[86]
NaCl	0,03	25	1,442 ± 0,003	[37]
	0,1	25	1,439 ± 0,004	

Литература

1. Богданов Н.С., Иванов О.П., Куприянова А.В. Холодильная техника. Свойства веществ: Справочник.— М.: Агропромиздат, 1985.— 208 с.
2. Бретшнайдер С. Свойства жидкостей и газов.— М.-Л.: Химия, 1966.— 536 с.
3. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей.— М.: Наука, 1972.— 720 с.
4. Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Тоцкий Е.Е. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов.— М.: Энергоатомиздат, 1990.— 352 с.

References

1. Bogdanov N.S., Ivanov O.P., Kupriyanova A.V. Refrigerating appliances. Properties of substances. Reference book.— Moscow: Agropromizdat, 1985.— 208 p.
2. Bretshnayder S. Properties of gases and liquids.— Moscow: Khimiya, 1966.— 535 p.
3. Vargaftik N.B. Reference book on thermophysical properties of gases and liquids.— Moscow: Nauka, 1972.— 720 p.
4. Vargaftik N.B., Filippov L.P., Tarzimanov A.A., Totskiy E.E. Reference book on thermal conductivity of liquids and gases.— Moscow: Energoatomizdat, 1990.— 352 p.

5. Грищенко А.Е., Грищенко Г.В. О концентрационной зависимости теплопроводности водных растворов // Журнал прикладной химии.– 1983.– Т. 56, N2.– С. 308–312.
6. Зарипов З.И., Булаев С.А., Мухамедзянов Г.Х. Изобарная теплоемкость и температуропроводность смесей полиэтиленгликолей при давлениях до 196 МПа // Химия и компьютерное моделирование. Бултеровские сообщения.– 2002.– Приложение к спецвыпуску N10.– С. 160–163.
7. Инженерный справочник. Таблицы DPVA info [Электронный документ] // [веб-сайт] www.dpva.info (12.05.2011).
8. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике.– М.: Наука, 1982.– 208 с.
9. Магомедов У.Б. Зависимость коэффициента теплопроводности воды от плотности при температурах до 200°C и давлениях до 1000 МПа // Деп. в ВИНТИ N8590-B85.
10. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций.– М: Мир, 1968.– 460 с.
11. Мухамедзянов Г.Х., Усманов А.Г. Теплопроводность органических жидкостей.– Л.: Химия, 1971.– 115 с.
12. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии.– Л.: Химия, 1987.– 576 с.
13. Расторгуев Ю.Л., Газдиев М.А. Исследование теплопроводности многоатомных спиртов // Инженерно-физический журнал.– 1969.– Т. 17, N 1.– С. 72–79.
14. Расторгуев Ю.Л., Газдиев Н.А. Теплопроводность многоатомных спиртов и их водных растворов // Журнал физической химии.– 1970.– Т. 44, N12.– С. 3092–3095.
15. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара.– М.: Энергия, 1980.– 424 с.
16. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие.– Л.: Химия, 1982.– 592 с.
17. Сморгин Г.И. Особенности кристаллизации неподвижной переохлажденной воды // Материалы Всесоюз. 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.1 / Под ред. В.Н. Юрнева и П.Д. Лебедева.– М.: Энергия, 1975.– 744 с.
21. Теплотехнический справочник. Т.2 / Под ред. В.Н. Юрнева и П.Д. Лебедева.– М.: Энергия, 1976.– 896 с.
22. Тимошенко Ю.П. Исследование процесса теплопереноса при замораживании биологических объектов: Дис. ... канд. техн. наук.– Харьков, 1982.– 148 с.
23. Тимошенко Ю.П., Гаврилова И.И. Размораживание биологических объектов СВЧ-энергией. II. Термодинамические свойства крови при ее размораживании // Криобиология и криомедицина.– 1976.– Вып. 2.– С. 47–49.
24. Тодрин А.Ф., Попивненко Л.И. Теплофизические свойства криопротекторов. III. Плотность, кинематическая вязкость и поверхностное натяжение ряда криопротекторов, их водных растворов и смесей // Проблемы криобиологии.– 2010.– Т.20, №4.– С. 416–435.
25. Тодрин А.Ф., Попивненко Л.И., Гордиенко Е.А. Теплофизические свойства криопротекторов. IV. Теплоемкость ряда криопротекторов, их водных растворов и смесей // Проблемы криобиологии.– 2011.– Т.21, N2.– С. 147–161.
26. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Справочник.– М.: Атомиздат, 1979.– 216 с.
27. Хантургаев Г.А., Репях С.М., Полякова Л.Е., Бадмацзыренов Б.В. Экспериментальное определение параметров хвойного лечебного экстракта, необходимых для оптимизации процесса концентрирования в роторно-вакуумном пленочном испарителе // Химия растительного сырья.– 1998.– №2.– С. 95–99.
28. Чижов Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов.– М.: Пищевая промышленность, 1979.– 272 с.
5. Grishenko A.Ye., Grishenko G.V. About concentration dependence of thermal conductivity of aqueous solutions // Zhurnal Prikladnoy Khimii.– 1983.– Vol. 56, N2.– P. 308–312.
6. Zaripov Z.I., Bulayev S.A., Mukhamedzyanov G.Kh. Isobaric thermal capacity and temperature conductivity of polyethylene glycols mixture at pressures up to 196 MPa // Chemistry and Computer Modelling. Butlerov Reports.– 2002. Supplement to special edition N10.– P. 160–163.
7. Engineering reference book. Tables DPVA info [Electronic document] // [web-site] www.dpva.info (12.05.2011).
8. Koshkin N.I., Shirkevich M.G. Reference book on elementary physics.– Moscow: Nauka, 1982.– 208 p.
9. Magomedov U.B. A dependence of water thermal conductivity on density at temperatures up to 200°C and pressures up to 1000 MPa // Filed in VINITI N8590-B85.
10. Misnar A. Thermal conductivity of solid substances, liquids, gases and their mixtures.– Moscow: Mir, 1968.– 460 p.
11. Mukhamedzyanov G.Kh., Usmanov A.G. Thermal conductivity of organic liquids.– Leningrad: Khimiya, 1971.– 115 p.
12. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. Examples and problems to the course of unit operations of chemical engineering.– Leningrad: Khimiya, 1987.– 576 p.
13. Rastorguyev Yu.L., Gazdiyev M.A. Investigation of polyatomic alcohols thermal conductivity // Inzhenerno-Fizicheskiy Zhurnal.– 1969.– Vol. 17, N1.– P. 72-79.
14. Rastorguyev Yu.L., Gazdiyev N.A. Thermal conductivity of polyatomic alcohols and their aqueous solutions // Journal of physical chemistry.– 1970.– Vol.44, N12.– P. 3092-3095.
15. Rivkin S.L., Aleksandrov A.A. Thermophysical properties of water and steam.– Moscow: Energiya, 1980.– 424 p.
16. Reed R., Prausnitz J., Sherwood T. Properties of gases and liquids: Reference Book.– Leningrad: Khimiya, 1982.– 592 p.
17. Smorygin G.I. Peculiarities of crystallization of immobile overcooled water // Problems of engineering glaciology. Proc. of All-Union Meeting.- Novosibirsk, 1986.– P. 16–23.
18. Reference Book on Physical and Technical Basics of Cryogenics / Ed. by M.P. Malkov.– Moscow: Energoatomizdat, 1985.– 432 p.
19. Tables of physical quantities. Reference book / Ed. by I.K. Kikoin.– Moscow: Atomizdat, 1976.– 1008 p.
20. Thermotechnical reference book. Vol. 1 / Ed. by V.N. Yurenev and P.D. Lebedev.– Moscow: Energiya, 1975.– 744 p.
21. Thermotechnical reference book. Vol. 2 / Ed. by V.N. Yurenev and P.D. Lebedev.– Moscow: Energiya, 1976.– 896 p.
22. Timoshenko Yu.P. Study of heat transfer process during freezing of biologic objects: Thesis of Cand. of Technical Sciences.– Kharkov, 1982.– 148 p.
23. Timoshenko Yu.P., Gavrilova I.I. Thawing of biological objects with SHF energy. II. Thermodynamic properties of blood during its thawing // Kriobiologiya i Kriomeditsina.– 1976.– Issue 2.– P. 47–49.
24. Todrin A.F., Popivnenko L.I. Thermophysical properties of cryoprotective agents. III. Density, kinematic viscosity and surface tension of some cryoprotective agents, their solutions and mixtures // Problems of Cryobiology.– 2010.– Vol. 20, N4.– P. 416–435.
25. Todrin A.F., Popivnenko L.I., Gordiyenko Ye.A. Thermophysical properties of cryoprotective agents. IV. Thermal capacity of some cryoprotective agents, their aqueous solutions and mixtures // Problems of Cryobiology.– 2011.– Vol. 21, N2.– P. 147–161.
26. Uong H. Basic formulas and data on heat exchange for engineers: Reference Book.– Moscow: Atomizdat, 1979.– 216 p.
27. Hanturgaev G.A., Repyakh S.M., Polakova L.E., Badmazirenov B.V. Experimental determination parameters of coniferous healing extract required for optimization of process of concentrating in rotor-vacuum film vaporizer // Chemistry of Plant Raw Materials.– 1998.– N2.– P. 95–99.
28. Chizhov G.B. Thermophysical processes in refrigeration technology of food products.– Moscow: Food Industry, 1979.– 272 p.

29. Ahlers G., Brown E., Araujo F.F. et al. Non-Oberbeck-Boussinesq effects in strongly turbulent Rayleigh-Benard convection // J. Fluid Mech.– 2006.– Vol. 569.– C. 409–445.
30. Al-Amayreh M. Experimental study of thermal conductivity of ethylene glycol water mixtures // Europ. J. Sci. Res.– 2010.– Vol. 44, N2.– P. 300–313.
31. Ali F.M., Yunus W.M.M., Moxsin M.M., Talib Z.A. Measurement thermal conductivity and thermal diffusivity of chromium nanofluids // Australian J. Basic Appl. Sci.– 2010.– Vol. 4, N8.– P. 3780–3793.
32. Andrieu J., Gonnet E., Laurent M. “Intrinsic” thermal conductivities of basic food components // High temp.– high pres.– 1987.– Vol.19.– P. 323-330.
33. Araki N. Measurement of thermal conductivity of molten salt using the hot wire method // Thermophysical Properties: Proceedings of the 1st Asian Thermophysical conference.– Beijing, 1986.– P. 427–432.
34. Assael M.J., Charitidou E., Wakeham W.A. Absolute measurements of the thermal conductivity of mixtures of alcohol with water // Int. J. Thermophys.– 1989.– Vol. 10, N4.– P. 793-803.
35. Azmi B.Z., Sing L.T., Saion E.B., Wahab Z.A. Thermal wave resonant cavity technique in measuring thermal diffusivity of sucrose solution // Petanika J. Sci. & Technol.– 2006.– Vol. 14, N1–2.– P. 33–40.
36. Bald W.B. Real cooling and warming rates during cryopreservation // Cryo-Letters.– 1993.– Vol. 14, N4.– P. 207–216.
37. Balderas-Lopez J.A., Mandelis A., Garsia J.A. Thermal-wave resonator cavity design and measurements of the thermal diffusivity of liquids // Rew. Sci. Instrum.– 2000.– Vol. 71, N7.– P. 2933–2937.
38. BASF Corporation – The chemical company [Электронный документ] // [веб-сайт] www2.basf.us/corporate/index.html (30.04.2011).
39. Benchikh O., Fournier D., Boccara A.C. Photothermal measurement of the thermal conductivity of supercooled water // J. Physique.– 1985.– Vol. 46, N5.– P. 727–731.
40. Bindhu C.V., Harilal S.S., Nampoori V.P.N., Vallabhan C.P.G. Thermal diffusivity measurements in organic liquids using transient thermal lens calorimetry // Opt. Eng.– 1998.– Vol. 37, N10.– P. 2791–2794.
41. Bowman H.F., Balasubramaniam T.A. A new technique utilizing thermistor probes for the measurement of thermal properties of biomaterials // Cryobiology.– 1976.– Vol.13, N5.– P. 572–580.
42. Brodkey R.S., Hershey H.C. Transport Phenomena: A Unified Approach.– Columbus: Brodkey Publishing, 2003.– Vol. 2.– 516 p.
43. Celanese chemicals [Электронный документ] // [веб-сайт] www.chemvip.com (15.05.2011).
44. Chem Group Incorporated [Электронный документ] // [веб-сайт] www.chem-group.com (11.06.2011).
45. Chi Z., Yunlong G. New thermal conductivity equations for pure liquids and liquid mixtures // Thermal Conductivity: Proc. 19th Thermal Conductivity conference.– Cookeville, Tennessee, 1988.– P. 317-327.
46. Choi J., Bischof J.C. Review of biomaterial thermal property measurements in the cryogenic regime and their use for prediction of equilibrium and non-equilibrium freezing applications in cryobiology // Cryobiology.– 2010.– Vol. 60, N1.– P. 52–70.
47. Crown Solutions Co., LLC [Электронный документ] // [веб-сайт] www.crownsolutions.com (17.06.2011).
48. Diller K.R. The influence of controlled ice nucleation on regulating the thermal history during freezing // Cryobiology.– 1985.– Vol. 22, N3.– P. 268–281.
49. ESSOM Co., LTD [Электронный документ] // [веб-сайт] www.essom.com (9.05.2011)
50. Figura L.O., Teixeira A.A. Food physics. Physical properties – measurement and application.– Berlin: Springer, 2007.– 550 p.
51. Flick E.W. Industrial solvents handbook.– Westwood: W. Andrew, 1998.– 963 p.

52. *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, Virginia, 1998.– 160 p.
53. *Goel M., Roy S.K., Sengupta S.* Laminar forced convection heat transfer in microcapsulated phase change material suspensions // *Inf. J. Heal Mass Transfer.*– 1994.– Vol. 37, N4.– P. 593–604.
54. *Hayes L.J., Diller K.R., Lee H.S., Baxter C.R.* On the definition of an average cooling rate during cell freezing // *Cryo-Letters.*– 1984.– Vol. 5, N5.– P. 97–110.
55. *HighExpert.RU – НИОКР, инженерные расчеты и услуги* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.highexpert.ru/index.php (1.06.2011).
56. *Hu L., Yang M., Wang C.* Determination of the concentrations of binary mixtures of glycerine and water by a transient method // *J. Therm. analysis.*– 1998.– Vol. 53, N3.– P. 855–859.
57. *Hukseflux. Thermal sensors* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.hukseflux.com (11.04.2011).
58. *James D.W.* The thermal diffusivity of ice and water between –40 and +60°C // *J. Mater. Sci.*– 1968.– Vol. 3, N5.– P. 540–543.
59. *Jingshan T., Qiangliang L.* New design of the instrument for measuring thermal conductivity of liquid and the measurement of the thermal conductivity of organic liquid mixture // *Thermophysical Properties: Proceedings of the 1st Asian Thermophysical conference.*– Beijing, 1986.– P. 433–437.
60. *Kaye & Laby Tables of physical and chemical constants* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.kayelab.npl.co.uk/toc/ (24.05.2011).
61. *Klieger P., Lamond J.F.* Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials.– Bridgeport: ASTM international, 1994.– 623 p.
62. *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. 408–418.
63. *Lienhard J.H.– IV, Lienhard J.H.– V.* A heat transfer textbook.– Cambridge: Phlogiston press, 1961.– 755 p.
64. *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.
65. *Martinez I.* Lectures on thermodynamics [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/index.html> (27.05.2011).
66. *MEGGlobal* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.meglobal.biz (4.04.2011).
67. *Miyawaki O., Pongsawatmanit R.* Mathematical analysis of the effective thermal conductivity of food materials in the frozen state // *Biosci. Biotech. Biochem.*– 1994.– Vol. 58, N7.– P. 1222–1225.
68. *Mohos F.* Confectionery and chocolate engineering: principles and application.– Singapore: Wiley-Blackwell, 2009.– 712 p.
69. *Muramatsu Y., Tagawa A., Kasai T.* Thermal conductivity of several liquid foods // *Food Sci. Technol. Res.*– 2005.– Vol. 11, N3.– P. 288–294.
70. *Nagasaka Y., Nagashima A.* Absolute measurement of the thermal conductivity of electrically conducting liquids by the transient hot-wire method // *J. Phys. E: Sci. Instrum.*– 1981.– Vol. 14, N12.– P. 1435–1440.
71. *Nieto-Draghi C., Avalos J.B., Rousseau B.* Transport properties of dimethyl sulfoxide aqueous solutions // *J. Chem. Phys.*– 2003.– Vol. 119, N9.– P. 4782–4789.
72. *NOAA.* National oceanic and atmospheric administration [Электронный документ] // [веб-сайт] www.noaa.gov (23.04.2011).
73. *Panzner M., Beulich G., Domschke I. et al.* Measurements of the thermal conductivity of biological tissues // *Studia biophysica.*– 1986.– Vol.113, N3.– P. 261–266.
74. *Rabin Y.* The effect of temperature-dependent thermal conductivity in heat transfer simulations of frozen biomaterials // *Cryo-Letters.*– 2000.– Vol. 21, N3.– P. 163–170.
52. *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, Virginia, 1998.– 160 p.
53. *Goel M., Roy S.K., Sengupta S.* Laminar forced convection heat transfer in microcapsulated phase change material suspensions // *Inf. J. Heal Mass Transfer.*– 1994.– Vol. 37, N4.– P. 593–604.
54. *Hayes L.J., Diller K.R., Lee H.S., Baxter C.R.* On the definition of an average cooling rate during cell freezing // *Cryo-Letters.*– 1984.– Vol. 5, N5.– P. 97–110.
55. *HighExpert.RU – R&D, engineering calculations and service* [Electronic document] // [web-site] www.highexpert.ru/index.php (1.06.2011).
56. *Hu L., Yang M., Wang C.* Determination of the concentrations of binary mixtures of glycerine and water by a transient method // *J. Therm. analysis.*– 1998.– Vol. 53, N3.– P. 855–859.
57. *Hukseflux. Thermal sensors* [Electronic document] // [web-site] www.hukseflux.com (11.04.2011).
58. *James D.W.* The thermal diffusivity of ice and water between –40 and +60°C // *J. Mater. Sci.*– 1968.– Vol. 3, N5.– P. 540–543.
59. *Jingshan T., Qiangliang L.* New design of the instrument for measuring thermal conductivity of liquid and the measurement of the thermal conductivity of organic liquid mixture // *Thermophysical Properties: Proceedings of the 1st Asian Thermophysical conference.*– Beijing, 1986.– P. 433–437.
60. *Kaye & Laby Tables of physical and chemical constants* [Electronic document] // [web-site] www.kayelab.npl.co.uk/toc/ (24.05.2011).
61. *Klieger P., Lamond J.F.* Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials.– Bridgeport: ASTM international, 1994.– 623 p.
62. *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. 408–418.
63. *Lienhard J.H.– IV, Lienhard J.H.– V.* A heat transfer textbook.– Cambridge: Phlogiston press, 1961.– 755 p.
64. *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.
65. *Martinez I.* Lectures on thermodynamics [Electronic document] // [web-site] <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/index.html> (27.05.2011).
66. *MEGGlobal* [Electronic document] // [web-site] www.meglobal.biz (4.04.2011).
67. *Miyawaki O., Pongsawatmanit R.* Mathematical analysis of the effective thermal conductivity of food materials in the frozen state // *Biosci. Biotech. Biochem.*– 1994.– Vol. 58, N7.– P. 1222–1225.
68. *Mohos F.* Confectionery and chocolate engineering: principles and application.– Singapore: Wiley-Blackwell, 2009.– 712 p.
69. *Muramatsu Y., Tagawa A., Kasai T.* Thermal conductivity of several liquid foods // *Food Sci. Technol. Res.*– 2005.– Vol. 11, N3.– P. 288–294.
70. *Nagasaka Y., Nagashima A.* Absolute measurement of the thermal conductivity of electrically conducting liquids by the transient hot-wire method // *J. Phys. E: Sci. Instrum.*– 1981.– Vol. 14, N12.– P. 1435–1440.
71. *Nieto-Draghi C., Avalos J.B., Rousseau B.* Transport properties of dimethyl sulfoxide aqueous solutions // *J. Chem. Phys.*– 2003.– Vol. 119, N9.– P. 4782–4789.
72. *NOAA.* National oceanic and atmospheric administration [Electronic document] // [web-site] www.noaa.gov (23.04.2011).
73. *Panzner M., Beulich G., Domschke I. et al.* Measurements of the thermal conductivity of biological tissues // *Studia biophysica.*– 1986.– Vol.113, N3.– P. 261–266.
74. *Rabin Y.* The effect of temperature-dependent thermal conductivity in heat transfer simulations of frozen biomaterials // *Cryo-Letters.*– 2000.– Vol. 21, N3.– P. 163–170.

75. *Rabin Y., Steif P.S.* Analysis of thermal stresses around a cryosurgical probe // *Cryobiology*.– 1996.– Vol. 33, N 2.– P. 276-290.
76. *Radhakrishnan S.* Measurement of thermal properties of seafood: Thesis ... Masters of Science, Blackburg, Virginia, 1997.– 83 p.
77. *Scott M.* The modeling of blood rheology in small vessels: Thesis ... Doctor of Philosophy, Ontario, Canada, 2005.– 127 p.
78. *Shell Chemical* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.shell.com (15.03.2011).
79. *Singh R.P., Heldman D.R.* Introduction to food engineering.– Amsterdam: Academic Press, 2009.– 841 p.
80. *Sugawara M., Inaba M., Seki N., Sato H.* Thermal conductivity of aqua-solvent with low solidification point // *Thermophysical Properties: Proceedings of the 1st Asian Thermophysical conference*.– Beijing, 1986.– P. 409–414.
81. *Taminco. People and molecules* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.taminco.com (28.03.2011).
82. *The Dow chemical company* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.dow.com (11.04.2011).
83. *The engineering tool box* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.engineeringtoolbox.com (3.05.2011).
84. *Thermal conductivity and thermal diffusivity of vegetables and fruits* [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://food.oregonstate.edu/energy/t10.html> (1.06.2011).
85. *Thermal conductivity science* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.hukseflux.com/thermal20%conductivity/thermal.htm (21.05.2011).
86. *Ukrainczyk N.* Thermal diffusivity estimation using numerical inverse solution for 1D heat conduction // *Int. J. Heat Mass Transfer*.– 2009.– Vol. 52, N25–26.– P. 5675–5681.
87. *Utah State University. Parameters for common solvents* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.usu.edu (20.04.2011).
88. *Valvano J.W.* Low temperature tissue thermal properties // In: *Low temperature biotechnology. Emerging applications and engineering contributions* / Eds.: J.J. McGrath, K.R. Diller.– Издательство, 1988.– P. 331–345.
89. *WEBA technology corporation* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.webacorp.com (2.06.2011).
90. *Welch A.J., van Gemert M.J.C.* Optical-thermal response of laser-irradiated tissue.– New York: Springer, 1995.– 925 p.
91. *Werner M., Baars A., Werner F. et al.* Thermal conductivity of aqueous sugar solutions under high pressure // *Int. J. Thermo-phys.*– 2007.– Vol. 28, N4.– P. 1161–1180.
92. *Yano K., Tasaka Y., Murai Y. et al.* Ultrasonic investigation on coupling of flows between liquid and liquid metal layers // 6th International symposium on ultrasonic Doppler methods for fluid mechanics and fluid engineering.– Prague, 2008.– P. 179–182.
93. *Zhangjiang I.* Absolute measurements of the thermal conductivity and thermal diffusivity of liquids with the line source probe technique // *Thermophysical Properties: Proceedings of the 1st Asian Thermophysical conference*.– Beijing, 1986.– P. 468–474.
75. *Rabin Y., Steif P.S.* Analysis of thermal stresses around a cryosurgical probe // *Cryobiology*.– 1996.– Vol. 33, N 2.– P. 276-290.
76. *Radhakrishnan S.* Measurement of thermal properties of seafood: Thesis ... Masters of Science, Blackburg, Virginia, 1997.– 83 p.
77. *Scott M.* The modeling of blood rheology in small vessels: Thesis ... Doctor of Philosophy, Ontario, Canada, 2005.– 127 p.
78. *Shell Chemical* [Electronic document] // [web-site] www.shell.com (15.03.2011).
79. *Singh R.P., Heldman D.R.* Introduction to food engineering.– Amsterdam: Academic Press, 2009.– 841 p.
80. *Sugawara M., Inaba M., Seki N., Sato H.* Thermal conductivity of aqua-solvent with low solidification point // *Thermophysical Properties: Proceedings of the 1st Asian Thermophysical conference*.– Beijing, 1986.– P. 409–414.
81. *Taminco. People and molecules* [Electronic document] // [web-site] www.taminco.com (28.03.2011).
82. *The Dow chemical company* [Electronic document] // [web-site] www.dow.com (11.04.2011).
83. *The engineering tool box* [Electronic document] // [web-site] www.engineeringtoolbox.com (3.05.2011).
84. *Thermal conductivity and thermal diffusivity of vegetables and fruits* [Electronic document] // [web-site] <http://food.oregonstate.edu/energy/t10.html> (1.06.2011).
85. *Thermal conductivity science* [Electronic document] // [web-site] www.hukseflux.com/thermal20%conductivity/thermal.htm (21.05.2011).
86. *Ukrainczyk N.* Thermal diffusivity estimation using numerical inverse solution for 1D heat conduction // *Int. J. Heat Mass Transfer*.– 2009.– Vol. 52, N25–26.– P. 5675–5681.
87. *Utah State University. Parameters for common solvents* [Electronic document] // [web-site] www.usu.edu (20.04.2011).
88. *Valvano J.W.* Low temperature tissue thermal properties // In: *Low temperature biotechnology. Emerging applications and engineering contributions* / Eds.: J.J. McGrath, K.R. Diller.– Издательство, 1988.– P. 331–345.
89. *WEBA technology corporation* [Electronic document] // [web-site] www.webacorp.com (2.06.2011).
90. *Welch A.J., van Gemert M.J.C.* Optical-thermal response of laser-irradiated tissue.– New York: Springer, 1995.– 925 p.
91. *Werner M., Baars A., Werner F. et al.* Thermal conductivity of aqueous sugar solutions under high pressure // *Int. J. Thermo-phys.*– 2007.– Vol. 28, N4.– P. 1161–1180.
92. *Yano K., Tasaka Y., Murai Y. et al.* Ultrasonic investigation on coupling of flows between liquid and liquid metal layers // 6th International symposium on ultrasonic Doppler methods for fluid mechanics and fluid engineering.– Prague, 2008.– P. 179–182.
93. *Zhangjiang I.* Absolute measurements of the thermal conductivity and thermal diffusivity of liquids with the line source probe technique // *Thermophysical Properties: Proceedings of the 1st Asian Thermophysical conference*.– Beijing, 1986.– P. 468–474.

Поступила 21.06.2011
Рецензент Т.П. Линник

Accepted 21.06.2011