

**Термофизические свойства криопротекторов.****VI. Диффузия и тепловое расширение ряда криопротекторов, их водных растворов и смесей****Thermophysical Properties of Cryoprotectants.****VI. Diffusion and Thermal Expansion of Several Cryoprotectants, Their Aqueous Solutions and Mixtures**

Систематизированы литературные данные по диффузии и тепловому расширению воды, чистых криопротекторов, их водных растворов и смесей. Построены эмпирические полиномиальные уравнения для расчета коэффициентов диффузии и теплового расширения воды и чистых криопротекторов в зависимости от температуры. Для водных растворов и смесей некоторых криопротекторов получены эмпирические полиномиальные уравнения в зависимости от температуры при фиксированных концентрациях или от концентрации при фиксированных температурах

**Ключевые слова:** криопротекторы, диффузия, тепловое расширение, эмпирические полиномиальные уравнения.

Систематизовано літературні дані по дифузії і тепловому розширенню води, чистих криопротекторів, їх водних розчинів і сумішей. Побудовано емпіричні поліноміальні рівняння для розрахунку коефіцієнтів дифузії і теплового розширення води і чистих криопротекторів 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:** криопротектори, дифузія, теплове розширення, емпіричні поліноміальні рівняння.

The paper systematizes the reference data on diffusion and thermal expansion of water, pure cryoprotectants, their aqueous solutions and mixtures. We obtained empirical polynomial equations for calculating the coefficients of diffusion and thermal expansion of water and pure cryoprotectants in dependence of the temperature. Empirical polynomial equations were obtained for aqueous solutions of cryoprotectants depending on the temperature and constant concentrations or depending on concentration and constant temperature.

**Key words:** cryoprotectants, diffusion, thermal expansion, empirical polynomial equations.

Диффузия – это перенос вещества из одной области в другую в пределах одной фазы при отсутствии перемешивания. Важная роль диффузии веществ в криобиологических процессах объясняется тем, что от ее величины в определенной степени зависят скорость прохождения веществ через мембрану клетки при насыщении ее криопротектором и выход воды из клетки.

Тепловое расширение – изменение линейных размеров и формы тела при изменении его температуры, которое следует учитывать при криоконсервировании на этапах охлаждения и нагрева биологических образцов. Кроме того, тепловое расширение чрезвычайно важно в dilatометрии, которая в последнее время все шире применяется в криобиологических исследованиях.

Цель работы – обобщение и систематизация литературных данных на основе построения эмпирических формул для расчета значений коэффици-

Diffusion is the transfer of a substance from one place to another within the same phase in the absence of mixing. Important role of substances' diffusion in cryobiological processes is caused by the fact that its contribution to some extent triggers the rate of substances penetration through the cell membrane during its saturation with cryoprotectants and as well as the water outflux from the cell.

Thermal expansion is the change in the linear dimensions and shape of a body resulted from changes in its temperature, which should be considered during cryopreservation at the stages of cooling and rewarming of biological samples. Moreover, thermal expansion is extremely important in the dilatometry, which has been recently widely used in cryobiological studies.

The aim of this study is to summarize and systematize the reference data basing on the obtained empirical formula to calculate the coefficients of diffusion and thermal expansion of pure cryoprotectants, their

циентов диффузии и теплового расширения чистых криопротекторов, их водных растворов и смесей в зависимости от массовой концентрации криопротектора и температуры.

Диффузию условно можно разделить на самодиффузию веществ, диффузию в растворах и диффузию в растворах при бесконечном разбавлении растворенного вещества. Самодиффузия – частный случай диффузии в чистом веществе или растворе постоянного состава, при которой диффундируют собственные частицы вещества. Диффузия в растворах – процесс взаимного проникновения молекул одного вещества между молекулами другого, приводящий к самопроизвольному выравниванию их концентраций по всему занимаемому объему. При этом перенос вещества происходит из области с высокой концентрацией в область с низкой. Скорость диффузии зависит от температуры, природы вещества и разности концентраций. Диффузия в бесконечно разбавленном растворе означает, что каждая молекула растворенного вещества находится в среде практически чистого растворителя.

В табл. 1–8 приведены уравнения для расчета коэффициентов диффузии некоторых веществ и их растворов в зависимости от температуры при фиксированной концентрации или от концентрации при фиксированной температуре, а также приведены коэффициенты самодиффузии ряда веществ и коэффициенты диффузии бесконечно разбавленных веществ в ряде растворителей.

Что касается теплового расширения жидкостей при постоянном давлении, то количественно оно характеризуется изобарным коэффициентом расширения (объемным коэффициентом теплового расширения).

Поскольку в доступной нам литературе данных по объемным коэффициентам теплового расширения криопротекторов не очень много, можно предложить уравнение для их приближенного вычисления [100]:

$$\beta \approx - \left( \frac{\ln \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)}{T_2 - T_1} \right)_P,$$

где  $\beta$  – объемный коэффициент теплового расширения жидкости, 1/К;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность жидкости при температурах  $T_1$  и  $T_2$  соответственно, кг/м<sup>3</sup>.

Более точные уравнения для расчета коэффициентов теплового расширения ряда веществ и их растворов в зависимости от температуры или концентрации приведены в табл. 9–11, а в табл. 12 представлены значения коэффициентов теплового расширения ряда криопротекторов.

aqueous solutions and mixtures as a function of the mass concentration of cryoprotectant and temperature.

Diffusion can be provisionally divided into self-diffusion of substances, diffusion in solutions and diffusion in solution under infinite dilution of the solute. Self-diffusion is a special case of diffusion in a pure substance or a solution of constant composition, when diffuse the own particles of the substance. Diffusion in solution is a process of mutual penetration of molecules of one substance between the molecules of another one, leading to spontaneous equalization of concentrations of the substances in the occupied volume. In this case, the mass transfer occurs from an area with high concentration to an area with low one. The diffusion rate depends on the temperature, the nature of substance and the difference in concentrations. Diffusion in an infinitely diluted solution means that each molecule of the solute is in virtually pure solvent.

Tables 1–8 represent the equations for the calculation of the diffusion coefficients of several substances and their solutions as a function of temperature at a fixed concentration or function of concentration at a fixed temperature, as well as self-diffusion coefficients for some substances, and the diffusion coefficients of infinitely diluted substances in several solvents.

Thermal expansion of the fluids at constant pressure is quantitatively characterized by isobaric expansion coefficient (the volumetric coefficient of thermal expansion).

Since the available literature does not contain enough data on the volumetric coefficients of thermal expansion of cryoprotectants, it was proposed the equation for their approximate calculation [100]:

$$\beta \approx - \left( \frac{\ln \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)}{T_2 - T_1} \right)_P,$$

where  $\beta$  is volumetric coefficient of thermal expansion of the fluid, 1/K;  $\rho_1$  and  $\rho_2$  are the densities of the liquid at the temperatures of  $T_1$  and  $T_2$ , respectively, kg/m<sup>3</sup>.

More exact equations to calculate the coefficients of thermal expansion for some substances and their solutions as a function of temperature and concentration are given in Table 9–11, and Table 12 shows the values of the coefficients of thermal expansion for several cryoprotectants.

The following abbreviations are used in the Tables:

BD – butane diol;

DMAc – dimethyl acetamide;

DMSO – dimethyl sulfoxide;

В таблицах приняты следующие условные обозначения:

БД – бутандиол;  
 ДМАц – диметилацетамид;  
 ДМСО – диметилсульфоксид;  
 ДМФА – диметилформамид;  
 ДЭГ – диэтиленгликоль;  
 МАц – метилацетамид;  
 МФА – метилформамид;  
 ПВП – поливинилпирролидон;  
 ПД – пропандиол;  
 ПЭГ – полиэтиленгликоль;  
 ТЭГ – триэтиленгликоль;  
 ФА – формамид;  
 ХФ – хлороформ;  
 ЭГ – этиленгликоль.

DMFA – dimethyl formamide;  
 DEG – diethylene glycol;  
 MAc – methyl acetamide;  
 MFA – methyl formamide;  
 PVP – polyvinyl pyrrolidone;  
 PD – propane diol;  
 PEO – polyethylene oxide;  
 TEG – triethylene glycol;  
 FA – formamide;  
 CF – chloroform;  
 EG – ethylene glycol.

**Таблица 1.** Уравнения для расчета коэффициентов самодиффузии воды и чистых криопротекторов в зависимости от температуры; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнений

**Table 1.** Equations to calculate the coefficients of self-diffusion of water and pure cryoprotectants depending on the temperature, approximation dispersion and temperature ranges of equations applicability

Вещество Substance	Уравнение ( $D, \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{c}$ ) Equation ( $D, \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ )	R2	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник References
Вода Water	$D = 3,838 \times 10^{-4}t^2 + 0,038t + 1,069$	0,9996	- 30...175	[4,15,23,54,57,86,103]
МАц MAc	$D = 1,096 \times 10^{-4}t^2 + 9,54 \times 10^{-4}t + 0,362$	0,9991	30...180	[84]
Метанол Methanol	$D = 3,738 \times 10^{-4}t^2 + 0,02236t + 1,502$	0,993	5...55	[64,100,105]
Этанол Ethanol	$D = 3,336 \times 10^{-4}t^2 + 0,009t + 0,6745$	0,9956	25...75	[5,15,19,103]
ЭГ EG	$D = -5,2665 \times 10^{-5}t^2 + 0,0404t + 0,18494$	0,9972	20...70	[19,24]

**Таблица 2.** Коэффициенты самодиффузии ряда веществ

**Table 2.** Self-diffusion coefficients of several substances

Объект Substance	Температура, °C Temperature, °C	$D, \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{c}$ $D, \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$	Источник References
Декстроза Dextrose	20	0,66	[78]
ДМСО DMSO	25	0,76	[76]
ДМФА DMFA	25	1,61	[76]
Ксилоза Xylose	20	0,74	[78]
МФА MFA	25	0,85	[76]
Фенол Phenol	25	0,78	[76]
Эритритол Erythrol	20	0,81	[78]

**Таблица 3.** Уравнения для расчета коэффициентов диффузии ряда водных растворов криопротекторов в зависимости от концентрации при фиксированных температурах; дисперсии аппроксимаций и диапазоны концентраций применения уравнений

**Table 3.** Equations to calculate the diffusion coefficients for aqueous solutions of several cryoprotectants as a function of concentration (C) and under constant temperatures, approximation dispersion and concentration ranges of equations applicability

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	Уравнение (D, ×10 <sup>-5</sup> см <sup>2</sup> /с) Equation (D, ×10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>	Диапазон концентраций, масс. % Concentration range, % w/w	Источник References
Аланин Alanine	20	$D = 0,0267C^2 - 0,068C + 0,8293$	1,0	0,25+1	[82]
	25	$D = 3,756 \times 10^{-4}C^2 - 0,0186C + 0,9156$	0,9917	0+17	[46,73,109]
Ацетамид Acetamide	25	$D = 6,693 \times 10^{-5}C^2 - 1,469 \times 10^{-2}C + 1,2408$	0,9962	0+65	[19]
Валин Valine	20	$D = 2,267 \times 10^{-3}C^2 - 0,054C + 0,7333$	1,0	0,25+1	[82]
	25	$D = 4,825 \times 10^{-3}C^2 - 0,0552C + 0,8026$	0,9269	0+6	[47,52,109]
Глицерин Glycerol	10	$D = 1,866 \times 10^{-3}C^2 - 5,257 \times 10^{-2}C + 0,7111$	0,9773	0+16	[14]
	18	$D = 9,252 \times 10^{-4}C^2 - 4,614 \times 10^{-2}C + 1,4156$	1,0	7+30	[26]
	25	$D = 7,973 \times 10^{-5}C^2 - 1,638 \times 10^{-2}C + 0,9408$	0,9971	0+80	[2,97]
	37	$D = 1,65 \times 10^{-5}C^2 - 9,017 \times 10^{-3}C + 0,7088$	0,9983	0+90	[1]
Глицин Glycine	1	$D = 5,511 \times 10^{-4}C^2 - 1,515 \times 10^{-2}C + 0,5195$	0,9989	0,25+4,5	[19]
	20	$D = 2,355 \times 10^{-2}C^2 - 5,967 \times 10^{-2}C + 0,9591$	1,0	0,33+1	[82]
	25	$D = 1,506 \times 10^{-3}C^2 - 3,023 \times 10^{-2}C + 1,0634$	0,9842	0+6,7	[19,47,52,109]
Глюкоза Glucose	18	$D = -4,778 \times 10^{-4}C^2 - 4,781 \times 10^{-3}C + 0,5714$	0,9975	0+18	[26]
	25	$D = 2,455 \times 10^{-5}C^2 - 1,033 \times 10^{-2}C + 0,676$	0,9996	0+80	[19,58,73,92]
	30	$D = -0,015C + 0,7666$	0,9657	0,03+1,8	[92]
	35	$D = 1,728 \times 10^{-5}C^2 - 1,174 \times 10^{-2}C + 0,8537$	0,9998	0+80	[19,58,92]
	39	$D = -0,0286C + 0,975$	0,9826	0,03+1,8	[92]
Декстран-10 Dextran-10	22	$D = -1,583 \times 10^{-5}C^3 + 1,935 \times 10^{-3}C^2 - 0,0806C + 1,264$	1,0	0+50	[32]
Декстран-40 Dextran-40	22	$D = -1,641 \times 10^{-3}C^2 + 0,011C + 1,1014$	0,9952	16+28	[31]
Декстран-70 Dextran-70	22	$D = -1,458 \times 10^{-4}C^3 + 5,898 \times 10^{-3}C^2 - 0,081C + 0,481$	1,0	0+20	[32]
ДМСО DMSO	25	$D = 4,731 \times 10^{-6}C^3 - 6,639 \times 10^{-4}C^2 - 0,0233C + 0,4147$	0,9824	30+100	[57]
ДМФА DMFA	25	$D = 1,496 \times 10^{-4}C^2 - 0,0154C + 0,5846$	0,9925	45+100	[65]
Ксилоза Xylose	25	$D = -1,835 \times 10^{-4}C^2 - 4,981 \times 10^{-3}C + 0,746$	0,9995	1,4+6,7	[98]
Лактоза Lactose	25	$D = 4,813 \times 10^{-3}C^2 - 0,0246C + 0,5689$	0,9999	0+3,5	[92]
	30	$D = 8,78 \times 10^{-3}C^2 - 0,0424C + 0,645$	0,9985	0+3,5	
	35	$D = 1,1508 \times 10^{-2}C^2 - 0,0535C + 0,7262$	0,9922	0+3,5	

Продолжение на следующей странице.  
Continued in the next page.

Продолжение таблицы 3  
Table 3 (continued)

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	Уравнение (D, ×10 <sup>-5</sup> см <sup>2</sup> /с) Equation (D, ×10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>	Диапазон концентраций, масс. % Concentration range, % w/w	Источник References
Лактоза Lactose	39	$D = 1,1204 \times 10^{-2} C^2 - 0,0533 C + 0,7919$	0,9962	0+3,5	[92]
	45	$D = 5,229 \times 10^{-3} C^2 - 0,0407 C + 0,8628$	0,9996	0+3,5	
	55	$D = 1,298 \times 10^{-2} C^2 - 0,0575 C + 1,0639$	0,9827	0+3,5	
Мальтоза Maltose	25	$D = -9,852 \times 10^{-5} C^2 - 8,318 \times 10^{-3} C + 0,52$	0,9996	0+8,7	[98]
Метанол Methanol	5	$D = 4,947 \times 10^{-8} C^4 - 8,736 \times 10^{-6} C^3 + 7,091 \times 10^{-4} C^2 - 0,0252 C + 0,8808$	0,9995	0+100	[105]
	15	$D = 9,617 \times 10^{-7} C^3 + 1,528 \times 10^{-4} C^2 - 0,0196 C + 1,2748$	0,9963	0+100	[19,64]
	20	$D = 1,0465 \times 10^{-3} C^2 - 0,0422 C + 1,7291$	1,0	2+13	[26]
	25	$D = 8,192 \times 10^{-7} C^3 + 2,076 \times 10^{-4} C^2 - 0,022 C + 1,5431$	0,982	0+100	[38,64,103,105]
Мочевина Urea	25	$D = 1,006 \times 10^{-4} C^2 - 0,0122 C + 1,3815$	0,9999	0+30	[19,46,105]
Пролин Proline	20	$D = -0,0214 C + 0,7995$	0,9995	0,25+1	[82]
	25	$D = -1,825 \times 10^{-4} C^2 - 4,297 \times 10^{-3} C + 1,3097$	0,9588	1+65	[44]
Сахароза Sucrose	1	$D = -0,0042 C + 0,2427$	0,9976	0,25+4,2	[19]
	25	$D = 5,517 \times 10^{-5} C^2 - 0,0101 C + 0,52486$	0,9889	0+70	[19,47,58,92,109]
	30	$D = 6,071 \times 10^{-5} C^2 - 1,147 \times 10^{-2} C + 0,5996$	0,9941	0+70	[19,92]
	35	$D = -0,0048 C + 0,708$	0,9071	0+3,5	[92]
	40	$D = 7,935 \times 10^{-5} C^2 - 1,458 \times 10^{-2} C + 0,7716$	0,9847	0+70	[19,58,92]
	45	$D = -0,0074 C + 0,9126$	0,8932	0+3,5	[92]
	50	$D = 2,207 \times 10^{-5} C^2 - 1,172 \times 10^{-2} C + 0,8836$	0,9779	3+70	[19]
	60	$D = 2,361 \times 10^{-5} C^2 - 1,28 \times 10^{-2} C + 1,0318$	0,9996	3+70	
	70	$D = 2,344 \times 10^{-5} C^2 - 1,429 \times 10^{-2} C + 1,2327$	0,9999	3+70	
	75	$D = 1,415 \times 10^{-5} C^2 - 1,637 \times 10^{-2} C + 1,3978$	0,999	8+70	
	80	$D = 2,222 \times 10^{-5} C^2 - 1,566 \times 10^{-2} C + 1,4602$	0,9999	3+70	
ТЭГ TEG	25	$D = -1,061 \times 10^{-6} C^3 + 2,369 \times 10^{-4} C^2 - 0,0183 C + 0,6348$	0,9983	0+100	[19]
	30	$D = -7,59 \times 10^{-7} C^3 - 4,152 \times 10^{-5} C^2 + 4,765 \times 10^{-3} C + 0,8726$	1,0	0+100	
	40	$D = -9,44 \times 10^{-7} C^3 + 2,246 \times 10^{-4} C^2 - 0,0189 C + 0,7604$	0,9999	0+100	
	45	$D = -1,402 \times 10^{-6} C^3 + 7,478 \times 10^{-6} C^2 + 4,372 \times 10^{-3} C + 1,2978$	1,0	0+100	
	65	$D = -3,115 \times 10^{-6} C^3 + 1,227 \times 10^{-4} C^2 + 4,817 \times 10^{-3} C + 2,1776$	1,0	0+100	

Продолжение на следующей странице.  
Continued in the next page.

Продолжение таблицы 3  
Table 3 (continued)

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	Уравнение (D, ×10 <sup>-5</sup> см <sup>2</sup> /с) Equation (D, ×10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>	Диапазон концентраций, масс. % Concentration range, % w/w	Источник References
Фенол Phenol	30	$D = -3,125 \times 10^{-3} C^2 - 4,875 \times 10^{-2} C + 1,1175$	0,9986	0+6	[41]
	40	$D = -8,125 \times 10^{-3} C^2 - 3,175 \times 10^{-2} C + 1,3315$	0,9997	0+6	
	55	$D = -1,1786 \times 10^{-2} C^2 - 1,771 \times 10^{-2} C + 1,7457$	0,9992	0+8	
Формамид formamide	18	$D = -0,0023 C^2 + 0,0598 C + 1,7255$	1,0	10+30	[26]
	25	$D = -5,248 \times 10^{-5} C^2 - 8,3524 \times 10^{-3} C + 1,608$	0,9975	0+5	[19]
Фруктоза Fructose	25	$D = -0,0093 C + 0,7014$	0,9778	0+2,5	[19,92]
	30	$D = -0,0139 C + 0,7688$	0,9884	0+1,8	[92]
	35	$D = -0,0155 C + 0,8519$	0,9977	0+1,8	
	39	$D = -0,0146 C + 0,9409$	0,9734	0+1,8	
Этанол Ethanol	10	$D = 1,165 \times 10^{-6} C^3 + 8,18 \times 10^{-5} C^2 - 1,911 \times 10^{-2} C + 0,8311$	0,9904	0+100	[14,19]
	15	$D = 2,285 \times 10^{-4} C^2 - 2,486 \times 10^{-2} C + 0,9248$	0,9983	5+50	[104]
	18	$D = -6,0044 \times 10^{-8} C^4 + 1,258 \times 10^{-5} C^3 - 5,187 \times 10^{-4} C^2 - 1,366 \times 10^{-2} C + 1,1012$	1,0	0+100	[19]
	20	$D = 4,176 \times 10^{-4} C^2 - 3,738 \times 10^{-3} C + 1,0171$	1,0	2,5+14	[26]
	25	$D = 3,255 \times 10^{-4} C^2 - 0,0337 C + 1,253$	0,9757	0+100	[19,38,103,104]
	35	$D = 4,976 \times 10^{-4} C^2 - 4,553 \times 10^{-2} C + 1,6274$	0,9963	5+50	[104]
	40	$D = 1,225 \times 10^{-6} C^3 + 2,52 \times 10^{-4} C^2 - 3,798 \times 10^{-2} C + 1,7062$	0,9973	0+100	[19]
	45	$D = 2,739 \times 10^{-4} C^2 - 3,097 \times 10^{-2} C + 1,7657$	0,9969	5+50	[104]
	58	$D = 9,03 \times 10^{-7} C^3 + 4,361 \times 10^{-4} C^2 - 5,365 \times 10^{-2} C + 2,4234$	0,9976	0+100	[19]
	73	$D = 1,761 \times 10^{-6} C^3 + 4,097 \times 10^{-4} C^2 - 5,673 \times 10^{-2} C + 2,9166$	0,999	0+100	
85	$D = 2,798 \times 10^{-6} C^3 + 4,2727 \times 10^{-4} C^2 - 6,405 \times 10^{-2} C + 3,5698$	0,9907	0+85		
ЭГ EG	25	$D = 7,264 \times 10^{-5} C^2 - 1,6287 \times 10^{-2} C + 1,1188$	0,8862	0+100	[19]
	40	$D = 9,721 \times 10^{-5} C^2 - 2,0083 \times 10^{-2} C + 1,4157$	0,7327	0+100	
	55	$D = 6,574 \times 10^{-5} C^2 - 2,1993 \times 10^{-2} C + 2,2637$	0,9982	0+100	
	70	$D = 1,145 \times 10^{-4} C^2 - 2,7886 \times 10^{-2} C + 2,7695$	1,0	0+100	
CaCl <sub>2</sub>	9	$D = -1,033 \times 10^{-4} C^3 + 2,342 \times 10^{-3} C^2 - 7,571 \times 10^{-3} C + 0,7935$	1,0	1,6+16	[3,27]
	25	$D = -1,612 \times 10^{-5} C^3 + 2,242 \times 10^{-4} C^2 + 1,292 \times 10^{-2} C + 1,0792$	0,9894	2+50	[15,19,25,91]
	37	$D = -1,22 \times 10^{-2} C^2 - 0,1401 C + 1,6103$	0,9983	0+1,1	[91]
	60	$D = -2,389 \times 10^{-5} C^3 - 4,274 \times 10^{-4} C^2 + 4,855 \times 10^{-2} C + 1,6726$	0,9994	2+28	[15]

Продолжение на следующей странице.  
Continued on the next page.

**Продолжение таблицы 3**  
**Table 3 (continued)**

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	Уравнение (D, ×10 <sup>-5</sup> см <sup>2</sup> /с) Equation (D, ×10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>	Диапазон концентраций, масс. % Concentration range, % w/w	Источник References
KCl	4	$D = - 3,154 \times 10^{-3} C^3 + 2,678 \times 10^{-2} C^2 - 6,803 \times 10^{-2} C + 1,0879$	0,9975	0,12+4	[19]
	18,5	$D = - 0,2449 C^3 + 0,6816 C^2 - 0,5864 C + 1,6969$	0,9975	0+1,5	[20,26,27]
		$D = 2,171 \times 10^{-4} C^3 - 6,526 \times 10^{-3} C^2 + 7,745 \times 10^{-2} C + 1,3149$	0,962	2,9+15	[20,26]
	25	$D = - 4,762 \times 10^{-2} C^3 + 0,1814 C^2 - 0,2393 C + 1,9584$	0,9681	0+1,92	[15,25,26,27]
		$D = - 4,733 \times 10^{-5} C^3 + 2,241 \times 10^{-3} C^2 - 1,323 \times 10^{-2} C + 1,8559$	0,9604	2,2+25,5	[3,15,19,25,26,27]
	30	$D = 5,4017 C^2 - 1,1119 C + 2,1957$	0,9992	0,02+0,09	[19]
60	$D = - 2,376 \times 10^{-4} C^3 + 5,774 \times 10^{-3} C^2 - 6,453 \times 10^{-3} C + 3,1556$	0,9961	1,9+21	[15]	
NaCl	15	$D = - 6,243 \times 10^{-5} C^3 + 1,636 \times 10^{-3} C^2 - 1,113 \times 10^{-3} C + 1,0901$	1,0	0,116+22,6	[14]
	18,5	$D = - 4,35 \times 10^{-5} C^3 + 2,108 \times 10^{-3} C^2 - 1,631 \times 10^{-2} C + 1,2425$	0,9585	0,29+29	[3,19,20,27]
	25	$D = 0,0342 C^4 - 0,1777 C^3 + 0,3374 C^2 - 0,2802 C + 1,5633$	0,9942	0,029+1,98	[15,19,25]
		$D = - 2,477 \times 10^{-5} C^3 + 9,76 \times 10^{-4} C^2 - 4,404 \times 10^{-3} C + 1,4788$	0,9856	2,8+25	[15,19,25]
	60	$D = 1,0747 C^2 - 2,321 C + 3,3$	1,0	0+1,28	[15]
		$D = - 4,438 \times 10^{-4} C^3 + 8,448 \times 10^{-3} C^2 + 4,372 \times 10^{-2} C + 2,0037$	0,9954	1,28+17	

**Таблица 4.** Уравнения для расчета коэффициентов диффузии ряда водных растворов криопротекторов в зависимости от температуры при фиксированных концентрациях; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнения

**Table 4.** Equations to calculate the diffusion coefficients of aqueous solutions of several cryoprotectants as a function of temperature at constant concentrations; approximation dispersions and temperature ranges of equations applicability.

Вещество Substance	Концентрация, масс. % Concentration, % w/w	Уравнение (D, ×10 <sup>-5</sup> см <sup>2</sup> /с) Equation (D, ×10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник References
Сахароза Sucrose	20	$D = 1,044 \times 10^{-4} t^2 + 3,729 \times 10^{-2} t + 0,1768$	0,9998	-2...100	[41]
Фенол Phenol	2	$D = 9,337 \times 10^{-3} t^2 + 2,029 \times 10^{-2} t + 0,2363$	0,9934	23,5...55	
	4	$D = 2,253 \times 10^{-4} t^2 + 5,203 \times 10^{-2} t + 0,508$	0,9934	23,5...55	
	6	$D = 4 \times 10^{-4} t^2 - 1,4 \times 10^{-2} t + 0,77$	1,0	30...55	

**Таблица 5.** Уравнения для расчета коэффициентов диффузии ряда веществ, растворенных в разных криопротекторах, в зависимости от концентрации растворителя при фиксированной температуре; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнений

**Table 5.** Equations to calculate diffusion coefficients for substances dissolved in various cryoprotectants, depending on solvent concentration at constant temperature; approximation dispersions and temperature ranges of equation applicability

Раствор Solution	Температура, °C Temperature, °C	Уравнение (D, ×10 <sup>-5</sup> см <sup>2</sup> /с) Equation (D, ×10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>	Диапазон концентраций растворителя, масс. % Solvent concentration range, % w/w	Источник References
Вода в ДМСО Water in DMSO	25	$D = -1,662 \times 10^{-6} C^3 + 5,857 \times 10^{-4} C^2 - 5,804 \times 10^{-2} C + 2,5$	0,9963	0+100	[57]
Вода в метаноле Water in methanol	5	$D = 5,484 \times 10^{-8} C^4 - 1,135 \times 10^{-5} C^3 + 1,021 \times 10^{-3} C^2 - 4,203 \times 10^{-2} C + 1,3014$	0,9962	0+100	[105]
	25	$D = 4,731 \times 10^{-8} C^4 - 9,946 \times 10^{-6} C^3 + 1,046 \times 10^{-3} C^2 - 5,344 \times 10^{-2} C + 2,2799$	0,9985	0+100	[103, 105]
Вода в мочеvine Water in urea	25	$D = -1,865 \times 10^{-4} C^2 - 1,099 \times 10^{-2} C + 2,2315$	0,9921	1,65+26,4	[50]
Вода в пролине Water in proline	25	$D = -1,2585 \times 10^{-4} C^2 - 2,593 \times 10^{-2} C + 2,8509$	0,9975	1+65	[44]
Вода в ПЭГ-1500 Water in PEG-1500	20	$D = -0,2192 C^2 + 0,651 C + 1,598$	0,9985	0,05+2	[13]
Вода в сахарозе Water in sucrose	25	$D = 1,274 \times 10^{-4} C^2 - 4,015 \times 10^{-2} C + 2,2637$	0,9999	9,2+27,6	[50]
Вода в этаноле Water in ethanol	25	$D = 1,457 \times 10^{-8} C^4 - 6,908 \times 10^{-6} C^3 + 1,079 \times 10^{-3} C^2 - 6,674 \times 10^{-2} C + 2,3004$	0,9975	0+100	[103]
Метанол в мочеvine Methanol in urea	25	$D = -5,773 \times 10^{-5} C^2 - 6,345 \times 10^{-3} C + 1,5619$	0,9996	1,65+26,4	[50]
Метанол в сахарозе Methanol in sucrose	25	$D = 1,237 \times 10^{-4} C^2 - 2,951 \times 10^{-2} C + 1,5938$	0,9981	9,2+27,6	[50]
ЭГ в ДЭГ EG in DEG	40	$D = 5,029 \times 10^{-6} C^2 - 3,749 \times 10^{-4} C + 0,08209$	0,9995	0+100	[19]
	60	$D = 1,52 \times 10^{-5} C^2 - 1,188 \times 10^{-3} C + 0,161$	0,9955	0+100	
	80	$D = 2,206 \times 10^{-5} C^2 - 1,57 \times 10^{-3} C + 0,312$	0,9965	0+100	
ЭГ в ТЭГ EG in TEG	40	$D = 4,267 \times 10^{-8} C^3 - 2,629 \times 10^{-6} C^2 - 6,381 \times 10^{-5} C + 7,5114 \times 10^{-2}$	0,9929	0+100	[19]
	60	$D = 5,867 \times 10^{-8} C^3 + 1,029 \times 10^{-6} C^2 - 3,395 \times 10^{-4} C + 0,1452$	0,998	0+100	
	80	$D = 5,8667 \times 10^{-8} C^3 + 6,7429 \times 10^{-6} C^2 - 7,1095 \times 10^{-4} C + 0,28493$	0,9999	0+100	
Этанол в ХФ Ethanol in CP	15	$D = 9,52 \times 10^{-8} C^4 - 1,315 \times 10^{-5} C^3 + 3,465 \times 10^{-4} C^2 - 1,005 \times 10^{-3} C + 1,6296$	1,0	3+88	[19]



**Таблица 6.** Уравнения для расчета коэффициентов диффузии бесконечно разбавленных водных растворов ряда криопротекторов в зависимости от температуры; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнений

**Table 6.** Equations to calculate diffusion coefficients for infinitely diluted aqueous solutions of several cryoprotectants depending on the temperature; approximation dispersions and temperature ranges of equations applicability

Вещество Substance	Уравнение ( $D, \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{c}$ ) Equation ( $D, \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ )	$R^2$	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник References
1,2-ГД 1,2-PD	$D = 2,4857 \times 10^{-4}t^2 + 1,0386 \times 10^{-2}t + 0,59086$	0,9984	25...50	[62,101]
Ацетамид Acetamide	$D = 3,5246 \times 10^{-4}t^2 + 2,0259 \times 10^{-2}t + 0,52133$	0,9891	4...37	[3,19,60,96]
Глицерин Glycerol	$D = 1,1467 \times 10^{-4}t^2 + 1,6493 \times 10^{-2}t + 0,4519$	0,9982	10...25	[1,5,11,12,19,24,26,60,68,97]
Глюкоза Glucose	$D = 2,6535 \times 10^{-4}t^2 + 4,1169 \times 10^{-3}t + 0,40474$	0,9914	15...37	[5,19,26,36,49,58,68,73,90,92,98]
ДЭГ DEG	$D = 2,4857 \times 10^{-4}t^2 + 5,4943 \times 10^{-3}t + 0,64389$	0,9956	30...50	[101]
Лактоза Lactose	$D = 2 \times 10^{-4}t^2 - 3 \times 10^{-3}t + 0,44$	1,0	20...30	[3,60,79,99]
Мальтоза Maltose	$D = 2,1091 \times 10^{-4}t^2 + 3,04 \times 10^{-3}t + 0,27713$	0,9985	10...30	[3,60,79,99]
Маннит Mannit	$D = 6,3422 \times 10^{-5}t^2 + 1,3528 \times 10^{-2}t + 0,2781$	0,9949	0...70	[3,19,36,49,60,62]
Метанол Methanol	$D = 2,2151 \times 10^{-4}t^2 + 3,291 \times 10^{-2}t + 0,67861$	0,9932	4...120	[5,11,12,19,24,26,60,68,72,77,103,105]
Мочевина Urea	$D = -2,1985 \times 10^{-5}t^2 + 2,8927 \times 10^{-2}t + 0,64803$	0,9939	1...37	[3,24,26,46,49,60,62,68,96]
Раффиноза Raffinose	$D = 1,3096 \times 10^{-4}t^2 + 5,7032 \times 10^{-3}t + 0,19502$	0,9974	1...37	[19,27,49,60,73,90]
Сахароза Sucrose	$D = 1,7042 \times 10^{-4}t^2 + 6,891 \times 10^{-3}t + 0,24757$	0,9763	1...45	[3,5,19,47,49,58,60,68,77,90,92,99,102]
ТЭГ TEG	$D = 8,1449 \times 10^{-4}t^2 - 3,7725 \times 10^{-2}t + 1,154$	0,9775	25...65	[19,101]
Фенол Phenol	$D = 5,064 \times 10^{-4}t^2 - 9,634 \times 10^{-3}t + 0,87935$	0,9857	18...70	[26,41,68]
Формаид Formamide	$D = 2,0003 \times 10^{-4}t^2 + 3,247 \times 10^{-2}t + 0,72181$	0,9959	4...37	[19,54]
Фруктоза Fructose	$D = 5,6919 \times 10^{-5}t^2 + 1,3793 \times 10^{-2}t + 0,30989$	0,9986	1...39	[19,92,99]
ЭГ EG	$D = 2,8096 \times 10^{-4}t^2 + 1,0813 \times 10^{-2}t + 0,68709$	0,9842	20...70	[19,24,77,97,101]
Этанол Ethanol	$D = 1,0739 \times 10^{-4}t^2 + 2,5352 \times 10^{-2}t + 0,59289$	0,9932	4...85	[5,11,19,24,26,60,68,77]
$\text{CaCl}_2$	$D = 3,7073 \times 10^{-4}t^2 + 1,0702 \times 10^{-2}t + 0,70081$	0,986	9...60	[3,15,19,49,91,95,102]
KCl	$D = 2,664 \times 10^{-4}t^2 + 3,3672 \times 10^{-2}t + 0,93125$	0,9939	4...60	[3,12,15,19,25,26,27,49,102]
NaCl	$D = 2,365 \times 10^{-4}t^2 + 2,9839 \times 10^{-2}t + 0,64355$	0,9951	15...60	[3,14,19,25,27,49,68,95,102]

**Таблица 7.** Уравнения для расчета коэффициентов диффузии бесконечно разбавленных растворов ряда веществ в криопротекторах в зависимости от температуры; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнений

**Table 7.** Equations to calculate diffusion coefficients for infinitely diluted solutions of several substances in cryoprotectants as a function of the temperature; approximation dispersions and temperature ranges of equations applicability

Вещество Substance	Растворитель Solvent	Уравнение ( $D, \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{c}$ ) Equation ( $D, \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ )	$R^2$	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник References
1,2-ПА 1,2-PD	ЭГ EG	$D = 3,5422 \times 10^{-5} t^2 + 5,9937 \times 10^{-4} t + 0,008385$	0,9887	25...50	[19]
Вода Water	Метанол Methanol	$D = 4,439 \times 10^{-4} t^2 + 1,9595 \times 10^{-2} t + 1,3576$	0,9959	5...50	[103,105]
ДЭГ DEG	ЭГ EG	$D = 1,08 \times 10^{-4} t^2 - 4,1 \times 10^{-3} t + 0,0908$	1,0	25...40	[19]

**Таблица 8.** Значения коэффициентов диффузии бесконечно разбавленных веществ в ряде растворителей  
**Table 8.** Diffusion coefficients of infinitely diluted substances in some solvents

Растворитель Solvent	Вещество Solute	Температура, °C Temperature, °C	$D, \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{c}$ $D, \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$	Источник References
Вода Water	1,4-БД 1,4-BD	25	1,0	[54]
	1,3-ПА 1,3-PD	25	1,17	[62]
	Аланин Alanine	25	0,912	[46, 73]
	Валин Valine	25	0,83	[47]
	Галактоза Galactose	1	0,3131	[19]
	Глицин Glycine	25	1,07	[19, 73]
		37	1,43	[49]
	Декстран-4 Dextran-4	22	0,148	[70]
	Декстран-500 Dextran-5000	22	0,031	[70]
	Декстран-2000 Dextran-2000	22	0,0056	[70]
	ДМАц DMAc	25	0,702	[37]
	ДМСО DMSO	25	0,8	[57]
	Ксилоза Xylose	25	0,7495	[98]
		30	0,763	[99]
	Маннит Mannit	20	0,605	[3,36]
		25	0,65	[60]
		37	0,933	[36,43]
ПВП (м.в.12000) PVP (m.w. 12000)	25	0,089	[8]	
ПЭГ-6000 PEG-6000	25	0,1152	[42]	

Продолжение на следующей странице.  
Continued on the next page.

Продолжение таблицы 8

Table 8 (continued)

Растворитель Solvent	Вещество Solute	Температура, °C Temperature, °C	D, $\times 10^{-5}$ см <sup>2</sup> /с D, $\times 10^{-5}$ cm <sup>2</sup> /s	Источник References
Вода Water	ПЭГ – 35000 PEG – 35000	25	0,35	[19]
	Серин Serin	25	0,88	[73]
Глицерин Glycerol	Вода Water	25	0,021	[60]
		20	0,0083	[19,20]
Метанол Methanol	Ацетамид Acetamide	25	1,729	[19]
	Вода Water	25	2,338	[19]
	Глицерин Glycerol	25	1,605	[19]
	Мочевина Urea	25	1,597	[19]
	Формамид Formamide	25	2,07	[19]
	Этиленгликоль Ethylene glycol	25	1,641	[19]
ТЭГ TEG	Вода Water	25	0,19	[24]
Хлороформ Chlorophorm	Фенол Phenol	25	2	[60]
		15	2,2	[20,24,47]
		23	1,91	[19]
Этанол Ethanol	Ацетамид Acetamide	25	0,68	[60]
		20	0,67	[3]
	Вода Water	25	1,167	[19,20,24,47]
		Глицерин Glycerol	25	0,56
	20		0,52	[3,20,24]
	Мочевина Urea	25	0,73	[60]
		12	0,54	[20,24]
	Фенол Phenol	20	0,8	[3,68]
		25	0,89	[60]
	Хлороформ Chlorophorm	25	1,38	[60]
		20	1,24	[3,68]
	ЭГ EG	Вода Water	25	0,18

Продолжение на следующей странице.  
Continued on the next page.

Продолжение таблицы 8  
Table 8 (continued)

Растворитель Solvent	Вещество Solute	Температура, °C Temperature, °C	D, ×10 <sup>-5</sup> см <sup>2</sup> /с D, ×10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s	Источник References
ЭГ EG	ΔЭГ DEG	25	0,0558	[19]
		30	0,065	
		40	0,0996	
	1,2-ПА 1,2-PD	25	0,0482	
		30	0,0532	
		40	0,0924	
		50	0,1259	
	1,2-ПА 1,2-PD	Вода Water	20	

Таблица 9. Уравнения для расчета коэффициентов теплового расширения воды и ряда чистых криопротекторов в зависимости от температуры; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнений  
Table 9. Equations to calculate thermal expansion coefficients for water and several pure cryoprotectants as a function of temperature; approximation dispersions and temperature ranges of equations applicability

Вещество Substance	Уравнение (β, ×10 <sup>-6</sup> 1/K) Equation (β, ×10 <sup>-6</sup> 1/K)	R <sup>2</sup>	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник References
Вода Water	$\beta = -2,115 \times 10^{-9}t^6 + 8,751 \times 10^{-7}t^5 - 1,358 \times 10^{-4}t^4 + 1,015 \times 10^{-2}t^3 - 0,42356t^2 + 18,211t - 54,961$	0,9988	-34...150	[10,16,21,22,27-30,39,51,56,59,63,66,71,75,110]
Лед Ice	$\beta = 0,252t + 56,003$	0,9911	-250...0	[69,75,83,87,88,93]
Глицерин Glycerol	$\beta = -9,5496 \times 10^{-3}t^3 - 2,61t^2 - 222,31t - 5497,5$	0,9989	-113...-64	[74]
	$\beta = -2,6432 \times 10^{-4}t^3 + 0,011183t^2 + 0,80966t + 483,63$	0,945	-64...50	[14,28,71,74,77]
DMCO DMSO	$\beta = 5 \times 10^{-3}t^2 + 0,15t + 970,0$	1,0	20...40	[34,43,76]
Метанол Methanol	$\beta = 9,0611 \times 10^{-5}t^3 + 0,012284t^2 + 3,1708t + 1072,3$	0,993	-95...120	[9,21,71,89,108]
ПЭГ-200 PEG-200	$\beta = 0,4612t + 656,1$	1,0	20...80	[107]
ПЭГ-400 PEG-400	$\beta = 0,5137t + 691,08$	0,9999	20...80	[106]
ФА FA	$\beta = 3,08 \times 10^{-3}t^2 + 1,001t + 722,4$	0,9999	3...150	[9,76,108]
Фенол Phenol	$\beta = 2,86 \times 10^{-3}t^2 + 1,63381t + 752,841$	0,9985	0...120	[21,34,76]
ХФ CP	$\beta = 0,01671t^2 + 3,245t + 1209,3$	0,99	-60...120	[12,21,27,108]
Этанол Ethanol	$\beta = 8,616 \times 10^{-4}t^3 - 0,08448t^2 + 4,46t + 1039,5$	0,986	0...120	[12,14,27,45,65,89]

**Таблица 10.** Уравнения для расчета коэффициентов теплового расширения ряда водных растворов криопротекторов в зависимости от концентрации при фиксированных температурах; дисперсии аппроксимаций и диапазоны концентраций применения уравнений

**Table 10.** Equations to calculate thermal expansion coefficients for aqueous solutions of some cryoprotectants as a function of concentrations at constant temperatures; approximation dispersions and temperature ranges of equations applicability

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	Уравнение ( $\beta$ , $\times 10^{-6}$ 1/K) Equation ( $\beta$ , $\times 10^{-6}$ 1/K)	R <sup>2</sup>	Диапазон концентраций, масс. % Concentration range, % w/w	Источник References
1,2-ПД 1,2-PD	25	$\beta = -6,2827 \times 10^{-4} C^3 + 0,03979 C^2 + 6,999 C + 252,94$	0,9969	0+100	[9,67]
Глицерин Glycerol	25	$\beta = -3,29 \times 10^{-4} C^3 + 0,02088 C^2 + 3,6067 C + 247,57$	0,9943	0+100	[45]
	15...20	$\beta = -4,2348 \times 10^{-4} C^3 + 0,023375 C^2 + 6,3707 C + 165,69$	0,9986	10+100	[80]
ДМФА DMFA	40...60	$\beta = -7,8778 \times 10^{-4} C^3 + 0,064996 C^2 + 6,9622 C + 456,94$	0,9916	0+100	[17]
	20...40	$\beta = -4,2422 \times 10^{-4} C^3 + 0,01424 C^2 + 9,4691 C + 309,94$	0,9973	0+100	
ФА FA	40...60	$\beta = 3,2943 \times 10^{-4} C^3 - 0,077259 C^2 + 7,3593 C + 465,71$	0,9857	0+100	[17]
	20...40	$\beta = 8,5188 \times 10^{-4} C^3 - 0,17524 C^2 + 13,453 C + 307,92$	0,994	0+100	
CaCl <sub>2</sub>	25	$\beta = 0,011161 C^2 + 4,2215 C + 277,49$	1,0	5+25	[6]
KCl	25	$\beta = -0,082771 C^2 + 8,2511 C + 246,2$	1,0	7+18	[6]

**Таблица 11.** Уравнения для расчета коэффициентов теплового расширения ряда водных растворов криопротекторов в зависимости от температуры при фиксированных концентрациях; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнения

**Table 11.** Equations to calculate thermal expansion coefficients for aqueous solutions of some cryoprotectants as a function of temperatures at constant concentrations; approximation dispersions and temperature ranges of equations applicability

Вещество Substance	Концентрация, масс. % Concentration, % w/w	Уравнение ( $\beta$ , $\times 10^{-6}$ 1/K) Equation ( $\beta$ , $\times 10^{-6}$ 1/K)	R <sup>2</sup>	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник References
1,2-ПД 1,2-PD	16,5	$\beta = 3,3534t + 58,305$	1,0	-10...20	[81]
	22,7	$\beta = 2,9064t + 84,701$	1,0	-12...20	
Аланин Alanine	0,25	$\beta = 2,8965 \times 10^{-3} t^3 - 0,68t^2 + 69,912t - 2043,2$	0,9994	5...95	[85]
Валин Valine	0,25	$\beta = 1,0289 \times 10^{-3} t^3 - 0,31347t^2 + 42,069t - 885,64$	0,9992	5...95	[85]
Глицерин Glycerol	20	$\beta = 4,9319 \times 10^{-3} t^2 + 4,5761t + 218,88$	0,9994	17,5...50	[71]
	40	$\beta = 0,032579t^2 + 0,20432t + 418,47$	0,9892	17,5...50	

Продолжение на следующей странице.  
Continued on the next page.

Продолжение таблицы 11  
Table 11 (continued)

Вещество Substance	Концентрация, масс. % Concentration, % w/w	Уравнение ( $\beta$ , $\times 10^{-6}$ 1/K) Equation ( $\beta$ , $\times 10^{-6}$ 1/K)	$R^2$	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник References
Глицерин Glycerol	60	$\beta = -0,025t^2 + 3,45t + 420,5$	0,9966	20...50	[71]
	65,4	$\beta = 8,6039 \times 10^{-3}t^2 + 4,5225t + 256,6$	0,9979	20...100	[29]
	73,3	$\beta = 0,011693t^2 + 3,7155t + 324,13$	0,9967	20...100	
	80	$\beta = -0,025t^2 + 2,45t + 470,5$	0,9818	20...50	[71]
Глюкоза Glucose	2,5	$\beta = 0,003t^2 + 8,19t + 50,2$	1,0	10...30	[35]
	10	$\beta = 0,0025t^2 + 8,358t + 50,5$	1,0	10...30	
	50	$\beta = 0,0025t^2 + 9,675t + 22,8$	1,0	10...30	
ДМСО DMSO	23,7	$\beta = 1,8648t + 95,57$	1,0	-7,7...20	[81]
	46,5	$\beta = 0,4592t + 198,09$	1,0	-36...20	
	55	$\beta = -0,1956t + 202,05$	1,0	-89...20	
	65	$\beta = -0,2028t + 238,31$	1,0	-95...20	
Сахароза Sucrose	2,5	$\beta = 0,003t^2 + 8,56t + 33,9$	1,0	10...30	[35]
	10	$\beta = 0,003t^2 + 7,07t + 105,0$	1,0	10...30	
	50	$\beta = 0,0035t^2 + 9,955t + 3,2$	1,0	10...30	
Серин Serine	0,25	$\beta = -4,835 \times 10^{-4}t^3 + 0,14778t^2 - 14,545t + 1045,9$	0,9903	5...95	[85]
ФА FA	13,7	$\beta = 2,6666t + 84,944$	1,0	-12...20	[81]
Этанол Ethanol	8,31	$\beta = -0,058765t^2 + 12,954t + 8,1328$	0,9997	10...60	[48]
NaCl	20	$\beta = -2,9762 \times 10^{-3}t^2 + 2,5t + 361,19$	0,9995	0...120	[21]

**Таблица 12.** Значения коэффициентов теплового расширения отдельных веществ  
**Table 12.** Thermal expansion coefficients for several substances

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	$\beta, \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ $\beta, \times 10^{-6} \text{ 1/K}$	Источник References
1,2-БД 1,2-BD	25	763,5	[9,76]
1,3-БД 1,3-BD	25	662	[9]
1,4-БД 1,4-BD	25	617	[9,76]
2,3-БД 2,3-BD	25	990	[76]
1,2-ПД 1,2-PD	15	730	[77]
	25	709,7	[9,45,76]
1,3-ПД 1,3-PD	25	602	[9,76]
ДМАц DMAc	25	972	[9,76]
ДМФА DMFA	20	1034	[7,94]
	25	1006	[9,76]
ДЭГ DEG	25	666	[9,76]
МАц MAc	25	829	[9,76]
МФА MFA	25	876,5	[9,76]
Сорбит Sorbitol	-6	445	[40]
ТЭГ TEG	20	690	[55]
	25	696	[9,76]
ЭГ EG	15	650	[77]
	20	619,4	[18,27,28,53]

### Литература

1. Абрамов А.Ю., Диков О.В., Рябухо В.П., Шиповская А.Б. Исследование процессов взаимодиффузии в тонких прозрачных средах методами лазерной интерферометрии // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, №3. – С. 253–264.
2. Абрамов А.Ю., Рябухо В.П., Шиповская А.Б. Метод лазерной интерферометрии в исследовании процесса диффузии в системе глицерин-вода // Известия Саратовского ун-та. – 2010. – Т. 10, Вып.2. – С. 35–41.
3. Бретшнайдер С. Свойства жидкостей и газов. – М.-Л.: Химия, 1966. – 536 с.
4. Вода и водные растворы при температурах ниже 0°C / Под ред. Ф. Франкса. – Киев: Наук. думка, 1985. – 388 с.

### References

1. Abramov A.Yu., Dikov O.V., Ryabukho V.P., Shipovskaya A.B. Study of self-diffusion processes in thin transparent media by laser interferometry method // Kompyuternaya Optika. – 2008. – Vol. 32, N3. – P. 253–264.
2. Abramov A.Yu., Ryabukho V.P., Shipovskaya A.B. Laser interferometry method in studying the diffusion process in the glycerol-water system // Izvestiya Saratovskogo Universiteta. – 2010. – Vol. 10, Issue 2. – P. 35–41.
3. Bretshnyder S. Properties of liquids and gases. – Moscow-Leningrad: Khimiya, 1966. – 536 p.
4. Water and aqueous solutions at the temperatures below 0°C / Ed. by F. Franks. – Kiev: Nauk. Dumka, 1985. – 388 p.

5. *Vorobyov A.Kh.* Diffusion issues in chemical kinetics. – Moscow: Moscow State University, 2003. – 98 p.
6. *Galinker I.S., Rodnynskiy I.M., Korobkov V.I., Lekakh N.B.* Differences in thermodynamic properties of water and electrolyte solutions depending on temperature // Ukr. fizicheskiy zhurnal. – 1964. – Т. 9, №4. – С. 401–405.
7. *Ganiyev Yu.A., Rastorguyev Yu.L.* Thermal conductivity of organic fluids // Inzh. Fiz. Zhurnal. – 1968. – Vol. 15, N3. – P. 519–525.
8. *Yevlampiyeva N.P., Lavrenko P.N., Melenevskaya Ye. Yu. et al.* Molecular properties of complexes of cyclic polymers with fullerene C60 in solutions // Fizika Tverdogo Tela. – 2002. – Т. 44, Вып.3. – С. 537–540.
9. *Zaychikov A.M.* Структурно-термодинамические характеристики и межмолекулярные взаимодействия в растворах с сетками водородных связей: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. – Иваново, 2009 – 32 с.
10. Engineering reference book. Tables DPVA info [Electronic document] // [web site] www.dpva.info (3.04.2012).
11. *Isakov A.Ya.* Молекулярная физика и термодинамика. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. – 343 с.
12. *Isakov A.Ya., Isakova V.V.* Физические величины. Справочник. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2001. – 130 с.
13. *Karmazina T.V., Slisenko V.I., Vasilkevich A.A. et al.* Effect of low concentrations of poly-ethylene glycols 1500 and 4000 on mechanisms of water molecules diffusion studied by neutronoscopy // Dopovidi Natsionalnoy akademii nauk Ukrainy. – 2008. – №2. – С. 80–85.
14. *Koshkin N.I., Shirkevich M.G.* Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1982. – 208 с.
15. Краткий справочник физико-химических величин. / Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой. – Л.: Химия, 1983. – 232 с.
16. *Kuchling H.* Reference book on physics. – Moscow: Mir, 1985. – 520 с.
17. *Maryin M.V., Reshetnikov S.M.* Экспериментальное исследование структурно-зависимых свойств водных растворов формамида и диметилформамида // Вестник Удмуртского ун-та. Физика. Химия. – 2010. – Вып. 2. – С. 11–20.
18. Новый справочник химика и технолога. Общие сведения. Строение веществ. Физические свойства важнейших веществ. Ароматические соединения. Химия фотографических процессов. Номенклатура органических соединений. Техника лабораторных работ. Основы технологии. Интеллектуальная собственность / Под ред. А.В. Москвина. – СПб: НПО «Профессионал», 2006. – 1464 с.
19. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. II / Под ред. Г.М. Островского, Е.В. Иванова, Ю.П. Удалова и др. – СПб: НПО «Профессионал», 2006. – 916 с.
20. Новый справочник химика и технолога. Электродные процессы. Химическая кинетика и диффузия / Под ред. С.А. Симановой. – СПб: НПО «Профессионал», 2004. – 838 с.
21. *Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A.* Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987 – 576 с.
22. *Путинцев Д.Н., Путинцев Н.М.* Теплоемкость и тепловое расширение воды // Вестник МГТУ. – 2003. – Т. 6, №1. – С. 155–158.
23. *Равдель А.А., Порай-Кошиц А.Б.* Диффузия в растворах и сольватация // Теоретическая и экспериментальная химия. – 1970. – Т. 6, №3. – С. 311–318.
24. *Rid R., Prausnitz J., Sherwood T.* Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
25. *Робинсон Р., Стокс Р.* Растворы электролитов. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. – 647 с.
26. Справочник химика. Т.3. Химическое равновесие и кинетика. Свойства растворов. Электродные процессы / Под ред. Б.П. Никольского. – М.-Л.: Химия, 1965. – 1008 с.
27. Tables of physical values. Reference book / Ed. by I.K. Kikoin. – Moscow: Atomizdat, 1976. – 1008 p.



27. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
28. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Справочник. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
29. Adamenko I.I., Zelinsky S.O., Korolovich V.V. Thermodynamics properties of glycerol-water solution // Ukr. J. Phys. – 2007. – Vol. 52, №9. – P. 855–859.
30. 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. – P. 409–445.
31. Albro M.B., Chahine N.O., Caligaris M. et al. Osmotic loading of spherical gels: a biomimetic study of hindered transport in the cell protoplasm // J. Biomech. Eng. – 2007. – Vol. 129, №4. – P.503–510.
32. Albro M.B., Rajan V., Li R., et al. Characterization of the concentration-dependence of solute diffusivity and partitioning in a model dextran-agarose transport system // Cell Mol. Bioeng. – 2009 – Vol. 2, №3. – P. 295–305.
33. Aloui F., Rehim F., Dumont E., Legrand J. Inverse method applied for the determination of the wall shear rate in a scraped surface heat exchanger using the electrochemical technique // Int. J. Electrochem. Sci. – 2008. – Vol. 3, №5. – P. 676–690.
34. Awasthi A., Tripathi B.S., Awasthi A. Thermal expansivity of ternary liquid mixtures: application of hard-sphere models and Flory's statistical theory // Acta Physica Polonica A. – 2010. – Vol. 118, N4. – P.589–595.
35. Barbosa R.D. High pressure and temperature dependence of thermodynamic properties of model food solutions obtained from in situ ultrasonic measurements: Thesis ... Doctor of Philosophy, 2003. – Florida. – 247 p.
36. Bashkatov A.N., Genina E.A., Sinichkin Y.P. et al. Glucose and mannitol diffusion in human Dura mater // Biophys. J. – 2003. – Vol. 85, №5. – P. 3310–3318.
37. Board W.J., Spalding S.C. Bulk flow in diffusion coefficient studies // AIChE J. – 1966. – Vol.12, №2. – P. 349–352.
38. Bosse D. Diffusion, viscosity, and thermodynamics in liquid systems: Dissertation ... Dr.-Ing. – Kaiserslautern, 2005. – 72 p.
39. Brodkey R.S., Hershey H.C. Transport phenomena: a unified approach. – Columbus: Brodkey Publishing, 1988. – 847 p.
40. Casalini R., Mohanty U., Roland C.M. et al. Thermodynamic interpretation of the scaling of the dynamics of supercooled liquids // J. Chem. Phys. – 2006. – Vol.125, №1. – P. 1–9.
41. Castillo R., Carza C., Orozco J. Mutual diffusion coefficients in the water-rich region of water phenol mixtures and their relation to aggregate formation // J. Phys. Chem. – 1992. – Vol. 96, №3. – P. 1475–1478.
42. Chang C.Y., Tsai W.T., Ing C.H. et al. Adsorption of polyethylene glycol (PEG) from aqueous solution onto hydro-phobic zeolite // J. Colloid Interface Sci. – 2003. – Vol. 260, №2. – P. 273–279.
43. Ciocirlan O., Fedeles A., Iulian O. Density and refractive indices of dimethyl sulfoxide +1-hexanol system at temperatures from 298.15 to 323.15 K // Rev. Roum. Chim. – 2010. – Vol. 55, №9. – P. 579–584.
44. Civera M., Sironi M., Fornili S.L. Unusual properties of aqueous solutions of L-proline: a molecular dynamics study // Chem. Phys. Lett. – 2005. – Vol. 415, №4–6. – P. 274–278.
45. Cristancho D.M., Delgado D.R., Martinez F. Volumetric properties of glycerol + water mixtures at several temperatures and correlation with the Jouyban-Acree model // Rev. Colomb. Cienc. Quim. Farm. – 2011. – Vol. 40, №1. – P. 92–115.
46. Curran P.F., Taylor A.E., Solomon A.K. Tracer diffusion and unidirectional fluxes // Biophys. J. – 1963. – Vol. 7, №6. – P. 879–901.
47. Cussler E.L. Diffusion, mass transfer in fluid systems. – Cambridge, UK: Cambridge university press. 1997. – 580 p.
48. Dickinson E., Thrift L.J., Wilson L. Thermal expansion and shear viscosity coefficients of water + ethanol + sucrose mixtures // J. Chem. Eng. Data. – 1980. – Vol. 25, №3. – P. 234–236.
28. Wang H. Basic formulas and data on thermal exchange for engineers: Reference book. – Moscow: Atomizdat, 1979. – 216 p.
29. Adamenko I.I., Zelinsky S.O., Korolovich V.V. Thermodynamics properties of glycerol-water solution // Ukr. J. Phys. – 2007. – Vol. 52, N9. – P. 855–859.
30. 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. – P. 409–445.
31. Albro M.B., Chahine N.O., Caligaris M. et al. Osmotic loading of spherical gels: a biomimetic study of hindered transport in the cell protoplasm // J. Biomech. Eng. – 2007. – Vol.129, N4. – P.503–510.
32. Albro M.B., Rajan V., Li R. et al. Characterization of the concentration-dependence of solute diffusivity and partitioning in a model dextran-agarose transport system // Cell Mol. Bioeng. – 2009 – Vol. 2, N3. – P. 295–305.
33. Aloui F., Rehim F., Dumont E., Legrand J. Inverse method applied for the determination of the wall shear rate in a scraped surface heat exchanger using the electrochemical technique // Int. J. Electrochem. Sci. – 2008. – Vol. 3, N5. – P. 676–690.
34. Awasthi A., Tripathi B.S., Awasthi A. Thermal expansivity of ternary liquid mixtures: application of hard-sphere models and Flory's statistical theory // Acta Physica Polonica A. – 2010. – Vol. 118, N4. – P.589–595.
35. Barbosa R.D. High pressure and temperature dependence of thermodynamic properties of model food solutions obtained from in situ ultrasonic measurements: Thesis ... Doctor of Philosophy, 2003. – Florida. – 247 p.
36. Bashkatov A.N., Genina E.A., Sinichkin Y.P. et al. Glucose and mannitol diffusion in human Dura mater // Biophys. J. – 2003. – Vol. 85, N5. – P. 3310–3318.
37. Board W.J., Spalding S.C. Bulk flow in diffusion coefficient studies // AIChE J. – 1966. – Vol.12, N2. – P. 349–352.
38. Bosse D. Diffusion, viscosity, and thermodynamics in liquid systems: Dissertation ... Dr.-Ing. – Kaiserslautern, 2005. – 72 p.
39. Brodkey R.S., Hershey H.C. Transport phenomena: a unified approach. – Columbus: Brodkey Publishing, 1988. – 847 p.
40. Casalini R., Mohanty U., Roland C.M. et al. Thermodynamic interpretation of the scaling of the dynamics of supercooled liquids // J. Chem. Phys. – 2006. – Vol.125, N1. – P. 1–9.
41. Castillo R., Carza C., Orozco J. Mutual diffusion coefficients in the water-rich region of water phenol mixtures and their relation to aggregate formation // J. Phys. Chem. – 1992. – Vol.96, N3. – P. 1475–1478.
42. Chang C.Y., Tsai W.T., Ing C.H. et al. Adsorption of polyethylene glycol (PEG) from aqueous solution onto hydro-phobic zeolite // J. Colloid Interface Sci. – 2003. – Vol. 260, N2. – P. 273–279.
43. Ciocirlan O., Fedeles A., Iulian O. Density and refractive indices of dimethyl sulfoxide + 1-hexanol system at temperatures from 298.15 to 323.15 K // Rev. Roum. Chim. – 2010. – Vol. 55, N9. – P. 579–584.
44. Civera M., Sironi M., Fornili S.L. Unusual properties of aqueous solutions of L-proline: a molecular dynamics study // Chem. Phys. Lett. – 2005. – Vol. 415, N4–6. – P. 274–278.
45. Cristancho D.M., Delgado D.R., Martinez F. Volumetric properties of glycerol + water mixtures at several temperatures and correlation with the Jouyban-Acree model // Rev. Colomb. Cienc. Quim. Farm. – 2011. – Vol. 40, N1. – P. 92–115.
46. Curran P.F., Taylor A.E., Solomon A.K. Tracer diffusion and unidirectional fluxes // Biophys. J. – 1963. – Vol. 7, N6. – P. 879–901.
47. Cussler E.L. Diffusion, mass transfer in fluid systems. – Cambridge, UK: Cambridge university press. 1997. – 580 p.
48. Dickinson E., Thrift L.J., Wilson L. Thermal expansion and shear viscosity coefficients of water + ethanol + sucrose mixtures // J. Chem. Eng. Data. – 1980. – Vol. 25, N3. – P. 234–236.

49. Diffusion coefficients [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://oto2.wustl.edu/cochlea/model/diffcoef.htm> (11.06.2012).
50. *Easteal A.J.* Tracer diffusion in aqueous sucrose and urea solutions // *Can. J. Chem.* – 1990. – Vol. 68, №9. – P. 1611–1615.
51. *Elert G.* The physics hypertextbook [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://hypertextbook.com/physics> (25.05.2012).
52. *Elerton H.D., Reinfeld G.* The mutual frictional coefficients of several amino acids // *J. Phys. Chem.* – 1964. – Vol. 68, №2. – P. 403–408.
53. Ethylene glycol product specifications [Электронный документ] // [веб-сайт] [www.lyondellbasell.com/pdf](http://www.lyondellbasell.com/pdf) (22.04.2012).
54. *Finkelstein A.* Water and nonelectrolyte permeability of lipid bilayer membranes // *J. Gen. Physiol.* – 1976. – Vol. 68, №2. – P. 127–135.
55. *Flick E.W.* Industrial solvents handbook. – Westwood: W. Andrew, 1998 – 963 p.
56. *Franks F., Mathias S.F., Hatley R.H.M. et al.* Water, temperature and life // *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* – 1990. – Vol. 326, №1237. – P. 517–533.
57. *Geerke D.P., Oostenbrink C., van der Vegt N.F.A. et al.* An effective force for molecular dynamics simulations of dimethyl sulfoxide and dimethyl sulfoxide-water mixtures // *J. Phys. Chem.* – 2004. – Vol. 108, №4. – P.1436–1445.
58. *Gladden J.K., Dole M.* Diffusion in supersaturated solutions. II. Glucose solutions // *J. Am. Chem. Soc.*, 1953. – Vol.75, №16. – P. 3900–3904.
59. *Grant-Taylor D.F., Macdonald D.D.* Thermal pressure and energy-volume coefficients for the acetonitrile + water system // *Can. J. Chem.* – 1976. – Vol. 54, №17. – P. 2813–2820.
60. *Green D.W., Perry R.H.* Perry's chemical engineers' handbook. Section 2 (8<sup>th</sup> edition). – NY: McGraw-Hill, 2008. – 517 p.
61. *Guin P.S., Das S., Mandal P.C.* Electrochemical reduction of sodium 1,4-dihydroxy-9,10-anthraquinone-2-sulphonate in aqueous and aqueous dimethyl formamide mixed solvent: a cyclic voltammetric study // *Int. J. Electrochem. Sci.* – 2008. – Vol. 3, №9. – P. 1016–1028.
62. *Harris T.R., Waters C.M., Haselton F.R.* Use of scaling theory to relate measurements of lung endothelial barrier permeability // *J. Appl. Physiol.* – 1994. – Vol.77, №5. – P. 2496–2505.
63. HighExpert.RU – НИОКР, инженерные расчеты и услуги [Электронный документ] // [веб-сайт] [www.highexpert.ru/index.php](http://www.highexpert.ru/index.php) (17.05.2012).
64. *Hiraoka H., Izui Y., Osugi J. et al.* Self-diffusion of methanol under pressure // *Rev. Phys. Chem. Jpn.* – 1958. – Vol. 28, №2. – P. 61–63.
65. *Holguin A.R., Delgado D.R., Martinez F. et al.* Study of some volumetric properties of glycerol formal + ethanol mixtures and correlation with the Jouyban-Acree model // *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* – 2011. – Vol. 35, №136. – P. 315–328.
66. H<sub>2</sub>O thermal expansion coefficient [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://physchem.kfunigraz.ac.at/sm/Service/Water/H2Othemexp.htm> (14.04.2012).
67. *Jimenez J., Martinez F.* Study of some volumetric properties of 1,2-propanediol + water mixtures at several temperatures // *Rev. Col. Cienc. Quim. Farm.* – 2005. – Vol. 34, №1. – P. 46–57.
68. Kirk-Othmer Encyclopedia of chemical technology. Vol.15. – New York: John Wiley & Sons, 2005. – 2077 p.
69. *LaPlaca S., Post B.* Thermal expansion of ice // *Acta Cryst.* – 1960. – Vol. 13, Pt. 6. – P. 503–505.
70. *Lawrence J.R., Wolfaardt G.M., Korber D.R.* Determination of diffusion coefficients in biofilms by confocal laser microscopy // *Appl. Environ. Microbiol.* – 1994. – Vol. 60, №4. – P. 1166–1173.
71. *Lienhard J.H. – IV, Lienhard J.H. – V.* A heat transfer textbook. – Cambridge: Phlogiston press, 1961. – 755 p.
72. *van Loon L.L., Allen H.C., Wyslouzil B.E.* Effective diffusion coefficients for methanol in sulfuric acid solutions measured
49. Diffusion coefficients [Электронный документ] // [web site] <http://oto2.wustl.edu/cochlea/model/diffcoef.htm> (11.06.2012).
50. *Easteal A.J.* Tracer diffusion in aqueous sucrose and urea solutions // *Can. J. Chem.* – 1990. – Vol. 68, N9. – P. 1611–1615.
51. *Elert G.* The physics hypertextbook [Электронный документ] // [web site] <http://hypertextbook.com/physics> (25.05.2012).
52. *Elerton H.D., Reinfeld G.* The mutual frictional coefficients of several amino acids // *J. Phys. Chem.* – 1964. – Vol. 68, N2. – P. 403–408.
53. Ethylene glycol product specifications [Электронный документ] // [web site] [www.lyondellbasell.com/pdf](http://www.lyondellbasell.com/pdf) (22.04.2012).
54. *Finkelstein A.* Water and nonelectrolyte permeability of lipid bilayer membranes // *J. Gen. Physiol.* – 1976. – Vol. 68, N2. – P. 127–135.
55. *Flick E.W.* Industrial solvents handbook. – Westwood: W. Andrew, 1998 – 963 p.
56. *Franks F., Mathias S.F., Hatley R.H.M. et al.* Water, temperature and life // *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* – 1990. – Vol. 326, N1237. – P. 517–533.
57. *Geerke D.P., Oostenbrink C., van der Vegt N.F.A. et al.* An effective force for molecular dynamics simulations of dimethyl sulfoxide and dimethyl sulfoxide-water mixtures // *J. Phys. Chem.* – 2004. – Vol. 108, N4. – P.1436–1445.
58. *Gladden J.K., Dole M.* Diffusion in supersaturated solutions. II. Glucose solutions // *J. Am. Chem. Soc.*, 1953. – Vol.75, N16. – P. 3900–3904.
59. *Grant-Taylor D.F., Macdonald D.D.* Thermal pressure and energy-volume coefficients for the acetonitrile + water system // *Can. J. Chem.* – 1976. – Vol. 54, N17. – P. 2813–2820.
60. *Green D.W., Perry R.H.* Perry's chemical engineers' handbook. Section 2 (8<sup>th</sup> edition). – NY: McGraw-Hill, 2008. – 517 p.
61. *Guin P.S., Das S., Mandal P.C.* Electrochemical reduction of sodium 1,4-dihydroxy-9,10-anthraquinone-2-sulphonate in aqueous and aqueous dimethyl formamide mixed solvent: a cyclic voltammetric study // *Int. J. Electrochem. Sci.* – 2008. – Vol. 3, N9. – P. 1016–1028.
62. *Harris T.R., Waters C.M., Haselton F.R.* Use of scaling theory to relate measurements of lung endothelial barrier permeability // *J. Appl. Physiol.* – 1994. – Vol.77, N 5. – P. 2496–2505.
63. HighExpert.RU – НИОКР, инженерные расчеты и услуги [Электронный документ] // [web site] [www.highexpert.ru/index.php](http://www.highexpert.ru/index.php) (17.05.2012).
64. *Hiraoka H., Izui Y., Osugi J. et al.* Self-diffusion of methanol under pressure // *Rev. Phys. Chem. Jpn.* – 1958. – Vol. 28, N2. – P. 61–63.
65. *Holguin A.R., Delgado D.R., Martinez F. et al.* Study of some volumetric properties of glycerol formal + ethanol mixtures and correlation with the Jouyban-Acree model // *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* – 2011. – Vol. 35, N136. – P. 315–328.
66. H<sub>2</sub>O thermal expansion coefficient [Электронный документ] // [web site] <http://physchem.kfunigraz.ac.at/sm/Service/Water/H2Othemexp.htm> (14.04.2012).
67. *Jimenez J., Martinez F.* Study of some volumetric properties of 1,2-propanediol + water mixtures at several temperatures // *Rev. Col. Cienc. Quim. Farm.* – 2005. – Vol. 34, N1. – P. 46–57.
68. Kirk-Othmer Encyclopedia of chemical technology. Vol.15. – New York: John Wiley & Sons, 2005. – 2077 p.
69. *LaPlaca S., Post B.* Thermal expansion of ice // *Acta Cryst.* – 1960. – Vol. 13, Pt. 6. – P. 503–505.
70. *Lawrence J.R., Wolfaardt G.M., Korber D.R.* Determination of diffusion coefficients in biofilms by confocal laser microscopy // *Appl. Environ. Microbiol.* – 1994. – Vol. 60, N4. – P. 1166–1173.
71. *Lienhard J.H. – IV, Lienhard J.H. – V.* A heat transfer textbook. – Cambridge: Phlogiston press, 1961. – 755 p.
72. *van Loon L.L., Allen H.C., Wyslouzil B.E.* Effective diffusion coefficients for methanol in sulfuric acid solutions measured

- by Raman spectroscopy // *J. Phys. Chem. A.* – 2008. – Vol. 112, №43. – P. 10758–10763.
73. Longsworth, L.G. Diffusion in liquids and the Stokes–Einstein relation // In: *Electrochemistry in biology and medicine* / Ed. by T. Shedlovsky. – New York: John Wiley & Sons, Inc, 1955. – P. 225–247.
74. Magazu S., Maisano G., Migliardo F. et al. Theoretical and experimental studies in hydrogen bonded glass forming systems // *Int. J. Phys. Sci.* – 2006. – Vol. 1, №3. – P. 126–139.
75. deMan J.M. Principles of food chemistry. – Gaithersburg: Aspen, 1999. – 520 p.
76. Marcus Y. The properties of solvents. – New York: John Wiley & Sons, 1999. – 242 p.
77. Martinez I. Lectures on thermodynamics [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/index.html> (11.02.2012).
78. Nghiem L.D., Schafer A.I., Elimelech M. Removal of nature hormones by nanofiltration membranes: measurement, modeling, and mechanisms // *Environ. Sci. Technol.* – 2004. – Vol. 38, №6. – P. 1888–1896.
79. Perry R.H., Chilton C.H. Chemical engineers' handbook. – New York: McGraw-Hill Book Co., 1973. – 1920 p.
80. Physical properties of glycerine and its solutions. ACI Science. American Cleaning Institute [Электронный документ] // [веб-сайт] [www.aciscience.org](http://www.aciscience.org) (1.06.2012).
81. Plitz J., Rabin Y., Walsh J.R. The effect of thermal expansion of ingredients on the cocktails VS55 and DP6 // *Cell Preservation Technology* – 2004. – Vol. 2, №3. – P. 215–226.
82. Polson A. On the diffusion constants of the amino-acids // *Biochem. J.* – 1937. – Vol. 31, №10. – P. 1903–1912.
83. Powell R.W. Preliminary measurements of the thermal conductivity and expansion of ice // *Proc. R. Soc. Lond. A.* – 1958. – Vol. 247, №1251. – P. 464–466.
84. Prashar N. Temperature dependence study of structure and dynamics of n-methyl acetamide at two isobars: Thesis ... Master of Science. – Patiala: School of Chemistry and Biochemistry, Thapar University, 2009 – 19 p.
85. Pressure perturbation calorimetry (PPC) [Электронный документ] // [веб-сайт] [www.microcal.com/documents/products\\_ppc-apnote.pdf](http://www.microcal.com/documents/products_ppc-apnote.pdf) (2.05.2012).
86. Prielmeier F.X., Lang E.W., Speedy R.J., Ludemann H.-D. Diffusion in supercooled water to 300 MPa // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – Vol. 59, №10. – P. 1128–1131.
87. Rabin Y., Steif P.S. Analysis of thermal stresses around a cryosurgical probe // *Cryobiology.* – 1996. – Vol. 33, №2. – P. 276–290.
88. Rabin Y., Taylor M.J., Wolmark N. Thermal expansion measurements of frozen biological tissues at cryogenic temperatures // *J. Biomech. Eng.* – 1998. – Vol.120, №4. – P. 259–266.
89. Ramana G.V., Rajagopal E., Murthy N.M. Ultrasonic studies on dilute solutions of water in n-alcohols and 2-alkoxyethanols // *Indian J. Pure Appl. Phys.* – 2005. – Vol. 43, №4. – P. 259–264.
90. Renkin E.M. Filtration, diffusion, and molecular sieving through porous cellulose membranes // *J. Gen. Physiol.* – 1954. – Vol. 38, №2. – P. 225–243.
91. Ribeiro A.C.F., Barros M.C.F., Teles A.S.N. et al. Diffusion coefficients and electrical conductivities for calcium chloride aqueous solutions at 298,15K and 310,15K // *Electrochimica Acta.* – 2008. – Vol. 54, №2. – P. 192–196.
92. Ribeiro A.C.F., Ortona O., Simoes S.M.N. et al. Binary mutual diffusion coefficients of aqueous solutions of sucrose, lactose, glucose, and fructose in the temperature range from 298,15 to 328,15 K // *J. Chem. Eng. Data.* – 2006. – Vol. 51, №5. – P. 1836–1840.
93. Rios J.L.J., Rabin Y. Thermal expansion of blood vessels in low cryogenics temperatures. Part I: a new experimental device // *Cryobiology.* – 2006. – Vol. 52, №2. – P. 269–283
- by Raman spectroscopy // *J. Phys. Chem. A.* – 2008. – Vol. 112, №43. – P. 10758–10763.
73. Longsworth, L.G. Diffusion in liquids and the Stokes–Einstein relation // In: *Electrochemistry in biology and medicine* / Ed. by T. Shedlovsky. – New York: John Wiley & Sons, Inc, 1955. – P. 225–247.
74. Magazu S., Maisano G., Migliardo F. et al. Theoretical and experimental studies in hydrogen bonded glass forming systems // *Int. J. Phys. Sci.* – 2006. – Vol. 1, №3. – P. 126–139.
75. deMan J.M. Principles of food chemistry. – Gaithersburg: Aspen, 1999. – 520 p.
76. Marcus Y. The properties of solvents. – New York: John Wiley & Sons, 1999. – 242 p.
77. Martinez I. Lectures on thermodynamics [Электронный документ] // [web site] <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/index.html> (11.02.2012).
78. Nghiem L.D., Schafer A.I., Elimelech M. Removal of nature hormones by nanofiltration membranes: measurement, modeling, and mechanisms // *Environ. Sci. Technol.* – 2004. – Vol. 38, №6. – P. 1888–1896.
79. Perry R.H., Chilton C.H. Chemical engineers' handbook. – New York: McGraw-Hill Book Co., 1973. – 1920 p.
80. Physical properties of glycerine and its solutions. ACI Science. American Cleaning Institute [Электронный документ] // [web site] [www.aciscience.org](http://www.aciscience.org) (1.06.2012).
81. Plitz J., Rabin Y., Walsh J.R. The effect of thermal expansion of ingredients on the cocktails VS55 and DP6 // *Cell Preservation Technology* – 2004. – Vol. 2, №3. – P. 215–226.
82. Polson A. On the diffusion constants of the amino-acids // *Biochem. J.* – 1937. – Vol. 31, №10. – P. 1903–1912.
83. Powell R.W. Preliminary measurements of the thermal conductivity and expansion of ice // *Proc. R. Soc. Lond. A.* – 1958. – Vol. 247, №1251. – P. 464–466.
84. Prashar N. Temperature dependence study of structure and dynamics of n-methyl acetamide at two isobars: Thesis ... Master of Science. – Patiala: School of Chemistry and Biochemistry, Thapar University, 2009 – 19 p.
85. Pressure perturbation calorimetry (PPC) [Электронный документ] // [web site] [www.microcal.com/documents/products\\_ppc-apnote.pdf](http://www.microcal.com/documents/products_ppc-apnote.pdf) (2.05.2012).
86. Prielmeier F.X., Lang E.W., Speedy R.J., Ludemann H.-D. Diffusion in supercooled water to 300 MPa // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – Vol. 59, №10. – P. 1128–1131.
87. Rabin Y., Steif P.S. Analysis of thermal stresses around a cryosurgical probe // *Cryobiology.* – 1996. – Vol. 33, №2. – P. 276–290.
88. Rabin Y., Taylor M.J., Wolmark N. Thermal expansion measurements of frozen biological tissues at cryogenic temperatures // *J. Biomech. Eng.* – 1998. – Vol.120, №4. – P. 259–266.
89. Ramana G.V., Rajagopal E., Murthy N.M. Ultrasonic studies on dilute solutions of water in n-alcohols and 2-alkoxyethanols // *Indian J. Pure Appl. Phys.* – 2005. – Vol. 43, №4. – P. 259–264.
90. Renkin E.M. Filtration, diffusion, and molecular sieving through porous cellulose membranes // *J. Gen. Physiol.* – 1954. – Vol. 38, №2. – P. 225–243.
91. Ribeiro A.C.F., Barros M.C.F., Teles A.S.N. et al. Diffusion coefficients and electrical conductivities for calcium chloride aqueous solutions at 298,15K and 310,15K // *Electrochimica Acta.* – 2008. – Vol.54, №2. – P. 192–196.
92. Ribeiro A.C.F., Ortona O., Simoes S.M.N. et al. Binary mutual diffusion coefficients of aqueous solutions of sucrose, lactose, glucose, and fructose in the temperature range from 298,15 to 328,15 K // *J. Chem. Eng. Data.* – 2006. – Vol. 51, №5. – P. 1836–1840.
93. Rios J.L.J., Rabin Y. Thermal expansion of blood vessels in low cryogenics temperatures. Part I: a new experimental device // *Cryobiology.* – 2006. – Vol. 52, №2. – P. 269–283

94. *Smallwood I.M.* Handbook of organic solvent properties. – London: Elsevier, 1996. – 306 p.
95. *Stoessel R.K., Hanor J.S.* A nonsteady state method for determining diffusion coefficients in porous media // *J. Geophys. Res.* – 1975. – Vol. 80, №36. – P. 4979–4982.
96. *Sung C.Y., Mu S.J.* Temperature effect on the permeation through poly(2-hydroxyethyl methacrylate) membrane // *J. Appl. Poly. Sci.* – 1982. – Vol. 27, №12. – P. 4661–4668.
97. *Ternstrom G., Sjostrand A., Aly G., Jernqvist A.* Mutual diffusion coefficients of water + ethylene glycol and water + glycerol mixtures // *J. Chem. Eng. Data.* – 1996. – Vol. 41, №4. – P. 876–879.
98. *Uedaira H., Uedaira H.* Diffusion coefficients of xylose and maltose in aqueous solution // *Bull. Chem. Soc. Jpn.* – 1969. – Vol. 42, №8. – P. 2140–2142.
99. *Venancio A., Teixeira J.A.* Characterization of sugar diffusion coefficients in alginate membranes // *Biotechnol. Tech.* – 1997. – Vol. 11, №3. – P. 183–185.
100. *Walser R., Mark A.E., van Gunsteren W.F. et al.* The effect of force-field parameters on properties of liquids: Parametrization of a simple three-site model for methanol // *J. Chem. Phys.* – 2000. – Vol. 112, №23. – P. 10450–10459.
101. *Wang M.-H., Soriano A.N., Li M.-H.* Diffusion coefficient of glycols in water at infinite dilution // 8<sup>th</sup> World Congress of Chemical Engineering. – Montreal, 2009. – P. 4.
102. *Wang Y., Combe C., Clark M.M.* The effects of pH and calcium on the diffusion coefficient of humic acid // *J. Membr. Sci.* – 2001. – Vol. 183, №1. – P. 49–60.
103. *Wensink E.J.W., Hoffmann A.C.* Dynamic properties of water/alcohol mixtures studied by computer simulation // *J. Chem. Phys.* – 2003. – Vol. 119, №14. – P. 7308–7317.
104. *Wiegand S., Ning H., Kriegs H.* Thermal diffusion forced Rayleigh scattering setup optimized for aqueous mixtures // *J. Phys. Chem. B.* – 2007. – Vol. 111, №51. – P. 14169–14174.
105. *Woolr L.A.* Insights into solute-solute-solvent interactions from transport property measurements with particular reference to methanol-water mixtures and their constituents // *Pure Appl. Chem.* – 1985. – Vol. 57, №8. – P. 1083–1090.
106. *Wu T.-Y., Chen B.-K., Hao L. et al.* Effect of temperature on the physico-chemical properties of a room temperature ionic liquid (1-methyl-3-pentylimidazolium hexafluorophosphate) with polyethylene glycol oligomer // *Int. J. Mol. Sci.* – 2011. – Vol. 12, №4. – P. 2598–2617.
107. *Wu T.-Y., Chen B.-K., Hao L. et al.* Physicochemical properties of glycine-based ionic liquid [quatgly-oet][etosoz] (2-ethoxy-1-ethyl-1,1-dimethyl-2-oxoethanaminium ethyl sulfate) and its binary mixtures with poly(ethylene glycol) (MW = 200) at various temperatures // *Int. J. Mol. Sci.* – 2011. – Vol. 12, №12. – P. 8750–8772.
108. *Yaws C.L.* Chemical properties handbook. – New York: McGraw-Hill, 1999. – 779 p.
109. *Zhao C., Jiding L., Ma P., Xia S.* Measurement of liquid diffusion coefficients of aqueous solutions of glycine, L-alanine, L-valine and L-isoleucine by holographic interferometry // *Chinese J. Chem. Eng.* – 2005. – Vol. 13, №2. – P. 285–290.
110. *Zhao Z.* Pulsed photoacoustic techniques and glucose determination in human blood and tissue [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://hercules.oulu.fi/isbn9514266900/isbn9514266900.pdf> (5.03.2012).
94. *Smallwood I.M.* Handbook of organic solvent properties. – London: Elsevier, 1996. – 306 p.
95. *Stoessel R.K., Hanor J.S.* A nonsteady state method for determining diffusion coefficients in porous media // *J. Geophys. Res.* – 1975. – Vol. 80, N36. – P. 4979–4982.
96. *Sung C.Y., Mu S.J.* Temperature effect on the permeation through poly(2-hydroxyethyl methacrylate) membrane // *J. Appl. Poly. Sci.* – 1982. – Vol. 27, N 12. – P. 4661–4668.
97. *Ternstrom G., Sjostrand A., Aly G., Jernqvist A.* Mutual diffusion coefficients of water + ethylene glycol and water + glycerol mixtures // *J. Chem. Eng. Data.* – 1996. – Vol. 41, N4. – P. 876–879.
98. *Uedaira H., Uedaira H.* Diffusion coefficients of xylose and maltose in aqueous solution // *Bull. Chem. Soc. Jpn.* – 1969. – Vol. 42, N 8. – P. 2140–2142.
99. *Venancio A., Teixeira J.A.* Characterization of sugar diffusion coefficients in alginate membranes // *Biotechnol. Tech.* – 1997. – Vol. 11, N3. – P. 183–185.
100. *Walser R., Mark A.E., van Gunsteren W.F. et al.* The effect of force-field parameters on properties of liquids: Parametrization of a simple three-site model for methanol // *J. Chem. Phys.* – 2000. – Vol. 112, N23. – P. 10450–10459.
101. *Wang M.-H., Soriano A.N., Li M.-H.* Diffusion coefficient of glycols in water at infinite dilution // 8<sup>th</sup> World Congress of Chemical Engineering. – Montreal, 2009. – P. 4.
102. *Wang Y., Combe C., Clark M.M.* The effects of pH and calcium on the diffusion coefficient of humic acid // *J. Membr. Sci.* – 2001. – Vol. 183, N1. – P. 49–60.
103. *Wensink E.J.W., Hoffmann A.C.* Dynamic properties of water/alcohol mixtures studied by computer simulation // *J. Chem. Phys.* – 2003. – Vol. 119, N 14. – P. 7308–7317.
104. *Wiegand S., Ning H., Kriegs H.* Thermal diffusion forced Rayleigh scattering setup optimized for aqueous mixtures // *J. Phys. Chem. B.* – 2007. – Vol. 111, N51. – P. 14169–14174.
105. *Woolr L.A.* Insights into solute-solute-solvent interactions from transport property measurements with particular reference to methanol-water mixtures and their constituents // *Pure Appl. Chem.* – 1985. – Vol. 57, N8. – P. 1083–1090.
106. *Wu T.-Y., Chen B.-K., Hao L. et al.* Effect of temperature on the physico-chemical properties of a room temperature ionic liquid (1-methyl-3-pentylimidazolium hexafluorophosphate) with polyethylene glycol oligomer // *Int. J. Mol. Sci.* – 2011. – Vol. 12, N4. – P. 2598–2617.
107. *Wu T.-Y., Chen B.-K., Hao L. et al.* Physicochemical properties of glycine-based ionic liquid [quatgly-oet][etosoz] (2-ethoxy-1-ethyl-1,1-dimethyl-2-oxoethanaminium ethyl sulfate) and its binary mixtures with poly(ethylene glycol) (MW = 200) at various temperatures // *Int. J. Mol. Sci.* – 2011. – Vol. 12, N12. – P. 8750–8772.
108. *Yaws C.L.* Chemical properties handbook. – New York: McGraw-Hill, 1999. – 779 p.
109. *Zhao C., Jiding L., Ma P., Xia S.* Measurement of liquid diffusion coefficients of aqueous solutions of glycine, L-alanine, L-valine and L-isoleucine by holographic interferometry // *Chinese J. Chem. Eng.* – 2005. – Vol. 13, N2. – P. 285–290.
110. *Zhao Z.* Pulsed photoacoustic techniques and glucose determination in human blood and tissue [Электронный документ] // [web site] <http://hercules.oulu.fi/isbn9514266900/isbn9514266900.pdf> (5.03.2012).

Поступила 31.07.2012

Accepted 31.07.2012