

Термофизические свойства криопротекторов.**III. Плотность, кинематическая вязкость и поверхностное натяжение ряда криопротекторов, их водных растворов и смесей**

UDC 547.42:532.14

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

Thermophysical Properties of Cryoprotective Agents.**III. Density, Kinematic Viscosity and Surface Tension of Some Cryoprotective Agents, Their Solutions and Mixtures**

Систематизированы литературные данные по значениям плотности, кинематической вязкости и поверхностному натяжению воды, чистых криопротекторов, их водных растворов и смесей. Построены эмпирические полиномиальные уравнения для расчета плотности, кинематической вязкости и поверхностного натяжения воды и чистых криопротекторов в зависимости от температуры. Получены коэффициенты полиномов для этих уравнений.

Ключевые слова: криопротектор, плотность, кинематическая вязкость, поверхностное натяжение, эмпирические полиномиальные уравнения.

Систематизовано літературні дані по значенням щільності, кінематичної в'язкості та поверхневого натягу води, чистих криопротекторів, їх водних розчинів і сумішей. Побудовано емпіричні поліноміальні рівняння для розрахунку щільності, кінематичної в'язкості і поверхневого натягу води і чистих криопротекторів в залежності від температури. Отримано коефіцієнти поліномів для цих рівнянь.

Ключові слова: криопротектор, щільність, кінематична в'язкість, поверхневий натяг, емпіричні поліноміальні рівняння.

The literature data for density, kinematic viscosity and surface tension values, pure cryoprotective agents, their solution and mixtures are summarized. The empiric polynomial equations for calculation of density, kinematic viscosity and surface tension of water, pure cryoprotective agents, their aqueous solutions and mixtures depending on temperature and concentration are derived.

Key words: cryoprotective agent, density, kinematic viscosity, surface tension, empiric polynomial equations.

Плотность, кинематическая вязкость и поверхностное натяжение жидкостей являются одними из важнейших физических свойств, без знания которых невозможно решить многие задачи в области биофизики, тепло- и массообмена, гидродинамики и других сфер, связанных с криобиологией и не только. Однако в доступной литературе отсутствуют систематизированные данные по указанным свойствам криопротекторов, имеются только отдельные их значения в различных статьях.

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

Экспериментальные данные по плотности, кинематической вязкости и поверхностному натя-

Density, kinematic viscosity and surface tension of fluids are ones of the important physical properties, without those it is impossible to solve many problems in biophysics, heat and mass transfer, hydrodynamics and other fields, associated not only with cryobiology. However in available literature the summarized data for presented cryoprotectant properties are absent, there are only their single values in different papers.

The aim of this work is to summarize and systematize the literature data on the base of deriving empiric equations to calculate the values of density, kinematic viscosity and surface tension of pure cryoprotectant agents, their aqueous solutions and mixtures depending on cryoprotectant mass concentration and temperature.

The experimental data found in literature for density, kinematic viscosity and surface tension of cryoprotective agents, their aqueous solutions and mixtures were processed with Microsoft Excel 2003 software.

In addition to the data for cryoprotectant agents there were processed the experimental literature data

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

жению крипротекторов, их водных растворов и смесей, найденные в литературе, были обработаны с помощью программы MS Excel 2003.

Наряду с данными для крипротекторов были обработаны экспериментальные литературные данные для воды, льда и ряда водных растворов веществ, которые важны как в жизнедеятельности человека, так и в криобиологии.

Значения плотности воды в зависимости от температуры приведены в литературных источниках [9, 10, 18, 29, 39, 43, 44, 48], из источников [16, 33, 52, 83] взяты данные по плотности льда. Полученные зависимости представлены на рисунке.

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

$$\rho = 1,0663 \times 10^{-5} t^3 - 5,3295 \times 10^{-3} t^2 + 9,3902 \times 10^{-3} t + 999,85,$$

где t – температура, °C.

Это уравнение позволяет рассчитать плотность воды в диапазоне температур от 0 до 150°C при дисперсии аппроксимации $R^2 = 0,99986$. В результате расчета получаем значение плотности воды в кг/м³.

Для переохлажденной воды в интервале температур -40...0°C плотность рассчитывается по формуле (при $R^2 = 0,999$):

$$\rho = 5,3242 \times 10^{-4} t^3 + 3,0962 \times 10^{-3} t^2 + 0,15454 t + 999,85.$$

Плотность льда (нижняя кривая на рисунке) описывается полиномом второй степени при $R^2 = 0,9526$:

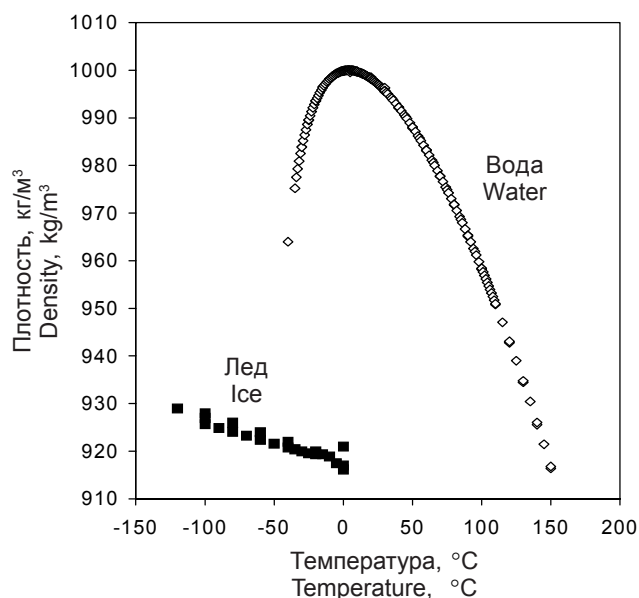
$$\rho = 1,59 \times 10^{-4} t^2 - 7,236 \times 10^{-2} t + 918.$$

Данное уравнение применимо в диапазоне температур -120...0°C.

Для чистых крипротекторов зависимость плотности от температуры определяется полиномом третьей степени:

$$\rho = a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (1)$$

Значения коэффициентов a_3, a_2, a_1, a_0 полинома (1) для ряда крипротекторов представлены в табл. 1. Для соблюдения размерности принимается: $a_3 -$



Зависимости плотностей воды и льда от температуры.
Dependencies of water and ice density on temperature.

for water, ice and some aqueous solutions of the substances, which are important both for human vital activity and cryobiology.

The values of aqueous density depending on temperature are presented in literature sources [9, 10, 18, 29, 39, 43, 44, 48], ice density data are taken from the sources [16, 33, 52, 83]. The obtained dependencies are presented in Fig.

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

$$\rho = 1.0663 \times 10^{-5} t^3 - 5.3295 \times 10^{-3} t^2 + 9.3902 \times 10^{-3} t + 999.85,$$

where t – temperature, °C

This equation enables to calculate the density of water within the range of temperatures from 0 to 100°C at approximation dispersion of $R^2 = 0.99986$. Due to calculation we obtain the value of water density in kg/m³.

For supercooled water within the interval of temperatures -40...0°C the density calculated with the formula (at $R^2 = 0.999$):

$$\rho = 5.3242 \times 10^{-4} t^3 + 3.0962 \times 10^{-3} t^2 + 0.15454 t + 999.85.$$

Ice density (lower curve in Fig.) is described with polynomial of the second degree (at $R^2 = 0.9526$):

$$\rho = 1.59 \times 10^{-4} t^2 - 7.236 \times 10^{-2} t + 918.$$

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

Table 1. Coefficients of equation (1) to calculate the density of some pure cryoprotective agents depending on temperature; approximation dispersion and temperature ranges of equation application

Вещество Substance	$a_3, \times 10^{-6}$	$a_2, \times 10^{-4}$	$a_1, \times 10^{-1}$	a_0	R^2	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник Reference
Амиды Amides							
ДМАц DMAc	0	0	-9,704	961,4	0,9952	0+125	[6,32,47,74,83]
ДФА DMFA	0	0	-9,538	967,7	0,8835	0+75	[6,10,32,45,64,74,83]
МА MA	0	0	-8,23	974,66	0,9988	30+60	[6]
МФА MFA	0	0	-8,574	1020,2	0,9976	15+35	[6,63]
ФА FA	0	0	-8,279	1149,6	0,9989	0+50	[6,10]
Оксиды Oxides							
ДМСО DMSO	0	0	-9,826	1119,5	0,9936	15+150	[3,10,14,31,32,38,62,74,83]
Спирты Alcohols							
Глицерин Glycerol	-6,992	-9,439	-4,346	1269	0,9901	0+170	[3,8,10,12,13,15,16,32,33,39,52,61,67,74,78]
ДЭГ	0	0	-7,245	1131	0,9995	0+100	[6]
Метанол Methanol	0	-18,98	-7,686	808,2	0,9963	-20+180	[10,12,13,15,52,62,74,83]
МХГГ GMCH	0	-9,351	-8,1723	1338	0,9999	0+210	[77]
Пропанол Propanol	0	-11,4	-7,621	819,7	0,9995	0+170	[12,13,74,83]
ТЭГ TEG	0	0	-8,139	1142,6	0,9999	10+150	[82]
ЭГ EG	0	31,38	-8,46	1127	0,7887	-10+60	[3,6,10,15,32,52,74,78,80,83,84]
Этанол Ethanol	0	-21,28	-7,115	805,1	0,9966	-20+180	[9,10,13,52,74,83]
1,2-ПА 1,2-PD	0	-36	-4,396	1046,1	0,9772	15+80	[6,15,52,59,74,78,80,83,92]

$\text{кг/м}^3 \times \text{°C}^{-3}$; $a_2 - \text{кг/м}^3 \times \text{°C}^{-2}$; $a_1 - \text{кг/м}^3 \times \text{°C}^{-1}$; $a_0 - \text{кг/м}^3$. Подобную зависимость, только описываемую полиномом второй степени, имеет плотность растворов криопротекторов от температуры.

Для определения плотности водных растворов криопротекторов в зависимости от их массовой концентрации используется полиномиальное уравнение:

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

где C – массовая концентрация криопротектора, %.

This equation is applied within the range of temperatures $-120...0^\circ\text{C}$.

For pure cryoprotective agents the dependence of density on temperature is determined with the polynomial of the third degree:

$$\rho = a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (1)$$

The values of polynomial coefficients $a_3 \div a_0$ (1) for some CPAs are given in the Table 1. To keep the dimensions it is assumed that: $a_3 - \text{кг/м}^3 \times \text{°C}^{-3}$; $a_2 - \text{кг/м}^3 \times \text{°C}^{-2}$; $a_1 - \text{кг/м}^3 \times \text{°C}^{-1}$; $a_0 - \text{кг/м}^3$. Density of

Такой же вид имеет зависимость для расчета плотности водных растворов NaCl и CaCl₂, а также смесей криопротекторов. Значения коэффициентов $b_4 \div b_0$ полинома (2) для водных растворов NaCl и CaCl₂, водных растворов ряда криопротекторов и их смесей представлены в табл. 2–5. Коэффициенты $b_4 \div b_0$ имеют размерность кг/м³.

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

БД – бутандиол;
 ГОЭК – гидроксиэтилкрахмал;
 ДМАц – диметилацетамид;
 ДМСО – диметилсульфоксид;
 ДМФА – диметилформамид;
 ДЭГ – диэтиленгликоль;
 М – мальтодекстрин;
 МАц – метилацетамид;
 МФА – метилформамид;
 МХГГ – монохлоргидрин глицерина;
 ОЭГ – оксиэтилированный глицерин;
 ПВП – поливинилпирролидон;
 ПД – пропандиол;
 ПЭГ – полиэтиленгликоль;
 ПЭО – полиэтиленоксид;
 ТЭГ – триэтиленгликоль;
 ФА – формамид;
 ЭГ – этиленгликоль.

Данных по кинематической вязкости криопротекторов и их растворов в доступной литературе чрезвычайно мало. Однако кинематическая вязкость ν может быть определена как отношение динамической вязкости μ жидкости к плотности ρ этой жидкости: $\nu = \mu/\rho$.

Данные по динамической вязкости криопротекторов и их водных растворов можно получить из [20], а данные по плотности приведены выше. Кинематическая вязкость ν имеет размерность сантистокс (1 сСт = 10⁻⁶ м²/с).

Для воды и чистых криопротекторов зависимость кинематической вязкости от температуры описывается полиномом:

$$\nu = c_5 t^5 + c_4 t^4 + c_3 t^3 + c_2 t^2 + c_1 t + c_0. \quad (3)$$

cryoprotectant solutions on temperature has the same dependence, described only with the polynomial of the second degree.

To determine the density of cryoprotectant aqueous solutions depending on their mass concentration there is used the polynomial equation:

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

where C – mass concentration of the cryoprotective agent, %.

The same appearance has the dependence for calculation density of aqueous solutions of NaCl and CaCl₂, as well as the mixtures of cryoprotective agents. The values of coefficients $b_4 \div b_0$ of polynomial (2) for aqueous solutions of NaCl and CaCl₂, aqueous solutions of some cryoprotective agents and their mixtures are given in the Tables 2–5. Coefficients $b_4 \div b_0$ have the dimensions of kg/m³.

Except the polynomial coefficients there are presented in tables the approximation dispersion, application range of equations (temperature and concentration) and literature sources wherefrom the experimental data are derived. The application range of equations shows under what temperatures and concentrations the experimental data, presented in the papers were obtained. During calculation this range may be extended without significant loss of accuracy, especially for linear equations, described with the polynomial of the first degree.

The following symbols are shown in the tables:

BD – butane diol
 HES – hydroxiethyl starch
 DMAc – dimethyl acetamide
 DMSO – dimethyl sulfoxide
 DMFA – dimethyl formamide
 DEG – diethylene glycol
 M – maltodextrin
 MAc – methyl acetamide
 MFA – methyl formamide
 MChHG – monochlohydrin glycerol
 OEG – oxyethylated glycerol
 PVP – polyvinylpyrrolidone
 PD – propane diol
 PEG – polyethylene glycol
 PEO – polyethylene oxide
 TEG – triethylene glycol
 FA – formamide
 EG – ethylene glycol.

The data for kinematic viscosity of cryoprotective agents and their solutions in the available literature is extremely insufficient. However kinematic viscosity ν may be determined as ratio between of dynamic viscosity of fluid, μ , and its density: $\nu = \mu/\rho$.

The data for dynamic viscosity of cryoprotective agents and their aqueous solutions can be obtained from

Таблица 2. Коэффициенты уравнения (1) для расчета плотности ряда водных растворов криопротекторов при заданной концентрации в зависимости от температуры; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнения

Table 2. Coefficients of equation (1) to calculate the density of cryoprotective agents' some aqueous solutions at given concentration depending on temperature; approximation dispersion and temperature ranges of equation application

Вещество Substance	Концентрация, масс. % Concentration, % (w/w)	$a_2, \times 10^{-4}$	$a_1, \times 10^{-1}$	a_0	R^2	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник Reference
Глицерин Glycerol	50	-4,416	-4,655	1136	0,9463	-30÷60	[10,12,14,16,44, 73,74,82]
Метанол Methanol	40	0	-5,488	945,89	0,9999	0÷120	[12]
ЭГ EG	50	-15,77	-5,938	1075	0,9982	-20÷25	[3, 65]
Этанол Ethanol	20	-6,794	-4,912	978,2	0,999	0÷120	[12]
	40	-1,391	-6,1	947,2	0,9999	0÷120	
	60	-4,882	-6,418	904	0,9998	0÷120	
	80	-0,604	-7,421	857,7	0,9997	0÷120	

Таблица 3. Коэффициенты уравнения (2) для расчета плотности водных растворов NaCl и CaCl₂ в зависимости от концентрации при заданной температуре; дисперсии аппроксимаций и диапазоны концентраций применения уравнения

Table 3. Coefficients of equation (2) to calculate the density of NaCl and CaCl₂ aqueous solutions depending on concentration at given temperature; approximation dispersion and concentration ranges of equation application

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	$b_3, \times 10^{-4}$	$b_2, \times 10^{-2}$	b_1	b_0	R^2	Диапазон концентраций C, масс. % Concentration range, % (w/w)	Источник Reference
CaCl ₂	15,6	0	4,688	7,933	999,1	0,9999	0÷30	[35]
	20	0	4,736	8,0285	998,3	1	0÷40	[54]
NaCl	15	3,963	0,5603	7,369	999,1	1	0÷25	[10,17,48, 52,59,60]
	20	0	2,346	7,02	998,2	1	0÷30	
	25	-1,818	3,351	7,553	997,1	1	0÷60	

Значения коэффициентов $c_5 \div c_0$ полинома (3) для воды и ряда криопротекторов представлены в табл. 6. Для соблюдения размерности принимается: $c_5 - \text{cSt} \times \text{C}^{-5}$, $c_4 - \text{cSt} \times \text{C}^{-4}$, $c_3 - \text{cSt} \times \text{C}^{-3}$, $c_2 - \text{cSt} \times \text{C}^{-2}$, $c_1 - \text{cSt} \times \text{C}^{-1}$, $c_0 - \text{cSt}$. Подобную зависимость, определяемую полиномом третьей степени, имеет кинематическая вязкость водных растворов NaCl и раствора Рингера-Локка (табл. 7).

Кинематическая вязкость водных растворов криопротекторов в зависимости от их массовой концентрации описывается полиномиальным уравнением:

$$v = d_5 C^5 + d_4 C^4 + d_3 C^3 + d_2 C^2 + d_1 C + d_0, \quad (4)$$

[20], but the data for density are shown above. The v kinematic viscosity has centistoke dimension ($1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

The dependence of kinematic viscosity on temperature for water and pure cryoprotective agents is described with polynomial:

$$v = c_5 t^5 + c_4 t^4 + c_3 t^3 + c_2 t^2 + c_1 t + c_0. \quad (3)$$

The values of $c_5 \div c_0$ polynomial coefficients (3) for water and some cryoprotective agents are presented in Table 6. To keep the dimensions it is assumed that: $c_5 - \text{cSt} \times \text{C}^{-5}$, $c_4 - \text{cSt} \times \text{C}^{-4}$, $c_3 - \text{cSt} \times \text{C}^{-3}$, $c_2 - \text{cSt} \times \text{C}^{-2}$, $c_1 - \text{cSt} \times \text{C}^{-1}$, $c_0 - \text{cSt}$. Kinematic viscosity of NaCl aqueous solutions and Ringer-Lock solution has the same dependence, determined only with the polynomial of the third degree (Table 7).

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

Table 4. Coefficients of equation (2) to calculate the density of some aqueous cryoprotective agents depending on concentration at fixed temperatures; approximation dispersion and concentration ranges of equation application

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	$b_4, \times 10^{-6}$	$b_3, \times 10^{-4}$	$b_2, \times 10^{-2}$	$b_1, \times 10^{-2}$	b_0	R^2	Диапазон концентраций С, масс. % Concentration range, % (w/w)	Источник Reference
Амиды Amides									
ДМАц DMAc	25	-3,265	3,52	-0,8382	-2,098	997,1	0,9998	0+100	[47]
	35	-3,191	3,581	-1,019	-3,337	994,1	0,9999	0+100	
ДМФА DMFA	25	0,5065	-2,283	1,502	-25,86	997,1	0,9997	0+100	[11,47]
	35	0,1592	-1,524	1,038	-27,2	994	0,9998	0+100	
Мочевина Urea	20	0	0	0,5554	260,5	998,2	0,9999	0+50	[54,68,76]
	25	0	0	0,4355	262,5	997,1	1,0	0+40	
МФА MFA	25	0,6901	-1,724	0,6834	36,48	997,1	0,9995	0+100	[11,47]
	35	0,7056	-1,836	0,8495	23,91	994,1	0,9992	0+100	
Водорастворимые полимеры Water soluble polymers									
Декстран Dextran	20	0	0	0	387,8	998,1	0,9997	0+10	[54]
ПВП (м.в.10000) PVP (m.w. 10000)	25	0	-2,127	1,855	184,7	997,1	0,999	0+50	[37, 60]
	35	0	9,124	-5,398	278,7	994,1	0,9924	0+50	
	45	0	8,781	-5,344	274,2	990,3	0,9981	0+50	
	55	0	12,1	-7,317	290,1	985,7	0,9969	0+50	
ПЭГ-400 PEG-400	25	0	-1,264	1,022	148,2	997,1	0,9998	0+100	[34, 42, 68]
	27	0	-1,192	0,977	145,1	996,5	0,9999	0+100	
	30	0	-1,161	0,8889	148,9	995,7	0,9998	0+100	
	35	0	-1,145	0,8871	145,1	994,1	0,9998	0+100	
	37	0	-1,239	1,057	137,3	993,3	0,9998	0+100	
	40	0	-1,159	0,9318	139,7	992,2	0,9999	0+100	
	45	0	-1,103	0,8752	137,8	990,3	0,9998	0+100	
	50	0	-1,068	0,8398	136,1	988,1	0,9998	0+100	
55	0	-1,088	0,889	132,9	985,7	0,9998	0+100		

Продолжение на следующей странице.
Next page to be continued.

Продолжение табл. 4
Table 4. (Continued from the previous page)

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	$b_4, \times 10^{-6}$	$b_3, \times 10^{-4}$	$b_2, \times 10^{-2}$	$b_1, \times 10^{-2}$	b_0	R^2	Диапазон концентраций C, масс. % Concentration range, % (w/w)	Источник Reference
Водорастворимые полимеры Water soluble polymers									
ПЭГ-4000 PEG-4000	27	0	0	0,891	140,9	996,5	0,9945	0+40	[34]
	37	0	0	0,7302	139,3	993,3	0,996	0+40	
	40	0	0	0,5998	143,1	992	0,9953	0+40	
	45	0	0	0,585	139,8	990,3	0,9958	0+40	
	50	0	0	0,4554	142,1	987,7	0,9959	0+40	
	55	0	0	0,4192	140	985,7	0,9953	0+40	
ПЭГ-6000 PEG-6000	27	0	0	0,3748	160,7	996,5	0,9996	0+40	[34]
	37	0	0	0,3217	156,2	993,3	0,9998	0+40	
	40	0	0	0,2598	157,2	992	0,9996	0+40	
	45	0	0	0,2544	152,9	990,25	0,9995	0+40	
	50	0	0	0,2047	151,5	987,8	0,9986	0+40	
	55	0	0	0,4393	139,1	985,7	0,9977	0+40	
ПЭГ-8000 PEG-8000	25	0	0	-0,016	174,9	997,1	0,9999	0+40	[68]
Оксиды Oxides									
ДМСО DMSO	20	0	-1,88	1,775	108,6	998,2	0,9972	0+100	[27,32,51,62, 66,74,83,90]
	24	0	0	-0,447	146,3	997,32	0,9893	0+100	
	25	0	-1,719	1,637	106,2	997,1	0,9996	0+100	
	45	0	-1,565	1,446	96,79	990,25	0,9997	0+100	
	65	0	-14,23	1,271	89,96	980,6	0,9996	0+100	
Спирты Alcohols									
Глицерин Glycerol	-30	0	0	-0,763	372,3	983,9	0,9995	30+70	[10,12,14,44, 48,54,67,76]
	-20	0	0	-0,132	310,3	993,6	0,9975	20+80	
	-10	0	0	-0,08	292,2	998,1	0,9985	10+80	
	-5	0	0	0,0668	273,7	999,3	0,9996	30+80	
	0	0	0	0,9382	226,1	999,85	0,9954	0+60	
	15	0	0	0,1797	249,9	999,1	0,9998	0+100	
	20	0	0	0,2091	244,6	998,2	0,9995	0+100	
	25	0	0	0,2316	240,3	997,1	0,9988	0+100	
	30	0	0	0,2091	240,8	995,6	0,9998	0+100	

Продолжение на следующей странице.
Next page to be continued.

Продолжение табл. 4
Table 4. (Continued from the previous page)

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	$b_4, \times 10^{-6}$	$b_3, \times 10^{-4}$	$b_2, \times 10^{-2}$	$b_1, \times 10^{-2}$	b_0	R^2	Диапазон концентраций С, масс. % Concentration range, % (w/w)	Источник Reference
Спирты Alcohols									
Маннит Mannite	20	0	0	1,034	347,2	998,2	0,9999	0+15	[54]
Метанол Methanol	0	0	-0,518	-0,142	-124,8	999,8	0,9994	0+100	[12,36,54,58, 75,88,89]
	10	0	-0,49	-0,12	-138,6	999,6	0,9997	0+100	
	15	0	-0,548	-0,026	-147,5	999,1	0,9997	0+100	
	20	0	-0,46	-0,085	-151,7	998,2	0,9996	0+100	
	25	0	-0,427	-0,10	-159,7	997,1	0,9996	0+100	
	30	0	-0,319	-0,298	-155,8	995,6	0,9998	0+100	
Пропанол Propanol	25	0	68,35	-1,393	-121	997,1	0,9996	0+100	[89]
Сорбит Sorbitol	25	0	0	-0,689	375,4	997,1	0,9999	0+40	[91]
ТЭГ TEG	-17,8	0	0	-0,48	174,49	1030,9	1,0	50+90	[82]
	10	0	0	-0,29	152,32	1011,1	1,0	10+100	
	37,8	0	0	-0,55	175	991,01	1,0	10+100	
	65,6	0	0	-0,44	153,95	979,42	1,0	10+100	
	93,3	0	0	-0,35	140,54	961,74	1,0	10+100	
	121,1	0	0	-0,28	131,92	940,36	1,0	10+100	
	148,9	0	0	-0,21	124,98	916,78	1,0	10+100	
ЭГ EG	-10	0	0	-0,554	194,5	998,1	0,9989	0+50	[3,25,52,54 65,68]
	-5	0	0	-0,36	176,8	999,3	0,9993	0+50	
	15,6	0	0	-0,307	172,2	994,3	0,9996	25+65	
	20	0	0	-0,239	139,9	998,2	0,9979	0+100	
	25	0	0	0,01366	128,7	997,1	0,9997	0+50	
	26,7	0	0	-0,2	156,0	995,2	0,9996	25+65	
Этанол Ethanol	15,6	0	0	-0,838	-122,5	999,1	0,9993	0+100	[10,12,36,50, 56,74,75,83, 89]
	20	0	0	-0,782	-130,8	998,2	0,999	0+100	
	25	0	0	-0,736	-135,9	997,1	0,9988	0+100	

Продолжение на следующей странице.
Next page to be continued.

Продолжение табл. 4
Table 4. (Continued from the previous page)

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	$b_4, \times 10^{-6}$	$b_3, \times 10^{-4}$	$b_2, \times 10^{-2}$	$b_1, \times 10^{-2}$	b_0	R^2	Диапазон концентраций C, масс. % Concentration range, % (w/w)	Источник Reference
Спирты Alcohols									
1,2-ПД 1,2-PD	4,4	0	-1,54	0,748	112,6	1000	0,9988	20+65	[26,54,92]
	15,6	0	-1,098	0,627	91,62	999	0,9985	20+65	
	20	0	-0,85	0,479	74,4	998,2	0,9986	0+100	
	30	0	-0,708	0,279	75,27	995,7	0,9972	0+100	
	40	0	-0,701	0,274	71,51	992,2	0,9969	0+100	
	50	0	-0,683	0,252	67,53	988,1	0,9962	0+100	
	60	0	-0,67	0,2397	64,35	983,2	0,9957	0+100	
	70	0	-0,661	0,234	62,07	977,8	0,9953	0+100	
	80	0	-0,646	0,22	59,12	971,8	0,9947	0+100	
Углеводы Carbohydrates									
Глюкоза Glucose	20	0	0,4623	1,144	382,4	998,2	1,0	0+60	[10,54,59,68]
	25	0	0	3,08	352,6	997,1	0,9998	0+25	
Ксилоза Xylose	25	0	0	-1,34	365,6	997,1	1,0	0+40	[86]
Лактоза Lactose	20	0	-3,369	1,481	393,5	998,2	0,998	0+26	[53,54]
	25	0	0	0	390,97	997,1	0,9953	0+15	
Мальтоза Maltose	20	0	0	1,669	380,1	998,2	1,0	0+60	[54,86]
	25	0	0	-1,272	389,3	997,1	1,0	0+80	
Сахароза Sucrose	15	0	0	2,383	352	999,1	0,9988	0+100	[10,41,48, 54-56, 68,76]
	20	0	1,889	-0,134	414,3	998,2	0,999	0+100	
	25	0	0	1,322	390,6	997,1	0,9998	0+40	
	30	0	0	1,782	372,7	995,6	0,9991	0+60	
	60	0	0	-1,077	663,6	905,6	0,9823	50+100	
Трегалоза Trehalose	20	0	82,84	-30,61	696,8	998,2	0,9369	0+25	[87]
Фруктоза Fructose	20	0	0,2821	1,312	389,8	998,2	1,0	0+65	[54]

Таблица 5. Коэффициенты уравнения (2) для расчета плотности растворов ряда сахаров в ДМСО в зависимости от концентрации сахаров при фиксированных температурах; дисперсии аппроксимаций и диапазоны концентраций применения уравнения

Table 5. Coefficients of equation (2) to calculate the density of some sugars in DMSO depending on sugars' concentration at fixed temperatures; approximation dispersion and concentration ranges of equation application

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	$b_2, \times 10^{-3}$	b_1	b_0	R^2	Диапазон концентраций С, масс. % Concentration range, % (w/w)	Источник Reference
Глюкоза Glucose	25	5,067	3,745	1095,5	1,0	0+35	[70]
	35	3,662	3,811	1085,5	1,0	0+35	
	45	5,258	3,797	1075,7	1,0	0+35	
	55	4,363	3,846	1065,7	1,0	0+35	
Сахароза Sucrose	25	8,414	3,677	1095,5	1,0	0+40	[70]
	35	9,109	3,69	1085,5	1,0	0+40	
	45	9,299	3,708	1075,7	1,0	0+40	
	55	8,527	3,775	1065,7	1,0	0+40	
Фруктоза Fructose	25	6,246	3,533	1095,5	1,0	0+40	[70]
	35	6,623	3,544	1085,5	1,0	0+40	
	45	6,119	3,586	1075,7	1,0	0+40	
	55	6,49	3,592	1065,7	1,0	0+40	

Таблица 6. Коэффициенты уравнения (3) для расчета кинематической вязкости воды и ряда чистых криопротекторов в зависимости от температуры; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнения

Table 6. Coefficients of equation (3) to calculate the kinematic viscosity of water and some pure cryoprotective agents depending on temperature; approximation dispersion and concentration ranges of equation application

Вещество Substance	$c_5, \times 10^{-8}$	$c_4, \times 10^{-7}$	$c_3, \times 10^{-5}$	$c_2, \times 10^{-3}$	$c_1, \times 10^{-2}$	c_0	R^2	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник Reference
Вода Water	0	0,3129	-0,879	0,9675	-5,49	1,784	0,9997	0+100	[18,49,71]
Глицерин Glycerol	0	47117	-66427	35010	-84253	8331,9	0,9916	0+50	[3,52,77]
ДЭГ DEG	-1,318	60,78	-108,8	0,9606	-437,5	90,81	0,9989	0+150	[25]
ПЭГ-400 PEG-400	0	0	-356,3	461,3	-2144	387,2	0,9988	25+50	[42]
ТЭГ TEG	-1,266	60,99	-115,2	108,1	-523,8	114,1	0,9997	4+150	[25]
ЭГ EG	-6,26	195,7	-237,7	142,8	-447,4	67,62	1,0	0+100	[3,52,78,84]
1,2-ПА 1,2-PD	-392,4	6368	-3891	1175	-2083	227,6	0,999	-12+60	[25]

Таблица 7. Коэффициенты уравнения (3) для расчета кинематической вязкости водных растворов NaCl при заданной концентрации и раствора Рингера-Локка в зависимости от температуры; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнения

Table 7. Coefficients of equation (3) to calculate the kinematic viscosity of NaCl aqueous solutions at given concentration and Ringer-Lock solution depending on temperature; approximation dispersion and temperature ranges of equation application

Раствор Solution	Концентрация, масс. % Concentration,% (w/w)	$c_3, \times 10^{-6}$	$c_2, \times 10^{-4}$	$c_1, \times 10^{-2}$	c_0	R^2	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник Reference
NaCl	2,9	-1,279	3,377	-3,361	1,565	0,9997	20÷100	[49]
	5,8	-1,28	3,392	-3,393	1,597	0,9997	20÷100	
	8,7	-1,302	3,451	-3,46	1,64	0,9997	20÷100	
	11,6	-1,334	3,54	-3,556	1,693	0,9997	20÷100	
	14,5	-1,379	3,66	-3,68	1,756	0,9997	20÷100	
	17,4	-1,434	3,808	-3,831	1,829	0,9997	20÷100	
	20,3	-1,504	3,991	-4,012	1,913	0,9997	20÷100	
	23,2	-1,568	4,171	-4,204	2,005	0,9997	20÷100	
	26,1	-1,67	4,429	-4,447	2,11	0,9997	20÷100	
	29	-1,772	4,692	-4,704	2,224	0,9997	20÷100	
	31,9	-1,842	4,902	-4,939	2,341	0,9997	20÷100	
	34,8	-1,992	5,271	-5,274	2,479	0,9997	20÷100	
Рингера- Локка Ringer-Lock	-	-5,253	8,879	-5,648	1,884	0,9982	5÷40	[5]

где коэффициенты $d_5 \div d_0$ имеют размерность cSt и представлены в табл. 8.

В связи с тем, что для ряда криопротекторов и их растворов имеется недостаточно экспериментальных данных для построения эмпирических формул, мы приводим конкретные значения кинематической вязкости некоторых веществ и их водных растворов (табл. 9).

Наряду с приведенными выше данными по плотности и кинематической вязкости для моделирования, например процессов криоконсервирования мелкодисперсных систем, необходимо учитывать поверхностное натяжение внеклеточных сред. Поэтому нами были обработаны литературные данные по поверхностному натяжению воды, чистых криопротекторов и их водных растворов.

Поверхностное натяжение σ имеет размерность дин/см ($1 \text{ дин/см} = 10^{-3} \text{ Н/м}$).

Для воды и чистых криопротекторов зависимость поверхностного натяжения от температуры определяется полиномом:

Kinematic viscosity of aqueous solutions of cryoprotective agents depending on their mass concentration is described with polynomial equation:

$$v = d_5 C^5 + d_4 C^4 + d_3 C^3 + d_2 C^2 + d_1 C + d_0, \quad (4)$$

where $d_5 \div d_0$ coefficients have cSt dimension and are presented in Table 8.

Due to the fact that for some cryoprotective agents and their solutions there are insufficient experimental data for derivation of empirical equations we present the certain values of kinematic viscosity of some substances and their aqueous solutions (Table 9).

In addition to the presented above data for density and kinematic viscosity to simulate, for example the cryopreservation of finely divided systems, it is necessary to consider the surface tension of extracellular media. Therefore the literature data about surface tension of water, pure cryoprotective agents and their aqueous solutions were processed also.

The surface tension σ has a dyne/cm dimension ($1 \text{ dyne/cm} = 10^{-3} \text{ n/m}$).

Таблица 8. Коэффициенты уравнения (4) для расчета кинематической вязкости ряда водных растворов криопротекторов в зависимости от концентрации при фиксированных температурах; дисперсии аппроксимаций и диапазоны концентраций применения уравнения

Table 8. Coefficients of equation (4) to calculate the kinematic viscosity of some aqueous solutions of cryoprotective agents depending on concentration at fixed temperatures; approximation dispersion and concentration ranges of equation application

Раствор Solution	Температура, °C Temperature, °C	$d_3, \times 10^{-7}$	$d_4, \times 10^{-5}$	$d_3, \times 10^{-4}$	$d_2, \times 10^{-2}$	$d_1, \times 10^{-2}$	d_0	R^2	Диапазон концентраций C , масс. % Concentration range, % (w/w)	Источник Reference
Водорастворимые полимеры Water soluble polymers										
ПЭГ-4000 PEG-4000	25	0	1,552	-6,36	2,067	-1,423	0,893	0,9995	0÷45	[55]
ПЭГ-6000 PEG-6000	25	0	8,336	-30,1	6,837	-15,25	0,893	1,0	0÷45	[55]
Спирты Alcohols										
ЭГ EG	-20	0	0	24,3	-30,02	1280	-173	1,0	35÷50	[3]
	-15	0	0	2,278	2,862	-83,67	12,98	0,9994	25÷50	
	-10	0	0	-0,987	1,241	-26,43	5,574	0,9985	20÷50	
	0	0	0	0	0,1228	4,124	1,792	0,9987	0÷50	
	10	0	0	-0,92	0,42	0,101	1,308	0,989	0÷25	
	20	0	0	0	0,0668	1,529	1,005	0,9942	0÷50	
	50	0	0	0,139	-0,059	1,734	0,5537	0,9914	0÷50	
1,2-БД 1,2-BD	20	0	0,347	-4,862	2,297	-24,53	1,004	0,9981	0÷100	[36]
	40	0	0,078	-1,045	0,5066	-3,975	0,655	0,9991	0÷100	
1,3-БД 1,3-BD	20	0	0,742	-10,4	4,847	-58,86	1,004	0,9969	0÷100	[36]
	40	0	0,183	-2,512	1,199	-13,31	0,655	0,9961	0÷100	
1,4-БД 1,4-BD	20	0	-0,1416	3,66	-1,958	33,51	1,004	0,9941	0÷100	[36]
	40	0	0,08	-0,751	0,2838	-0,357	0,655	0,9999	0÷100	
Углеводы Carbohydrates										
Сахароза Sucrose	20	7,046	-8,004	32,81	-5,379	32,05	1,005	0,9998	0÷60	[41,46,81]
	30	1,167	-1,063	3,812	-0,486	4,052	0,801	1,0	0÷50	

$$\sigma = e_4 t^4 + e_3 t^3 + e_2 t^2 + e_1 t + e_0. \quad (5)$$

Значения коэффициентов $e_4 \div e_0$ полинома (5) для воды и ряда криопротекторов представлены в табл. 10. Для соблюдения размерности принимается e_4 – (дин/см) \times °C⁻⁴; e_3 – (дин/см) \times °C⁻³; e_2 – (дин/см) \times °C⁻²; e_1 – (дин/см) \times °C⁻¹; e_0 – дин/см. Подобную зависимость, только описываемую полиномом первой степени, имеют водные растворы глицерина, концентрация которых задана в объемных %. Значения коэффициентов e_1 и e_0 представлены в табл. 11.

The dependence of surface tension on temperature for water and pure cryoprotective agents is determined with polynomial expression:

$$\sigma = e_4 t^4 + e_3 t^3 + e_2 t^2 + e_1 t + e_0. \quad (5)$$

Coefficients $e_4 \div e_0$ for polynomial (5) for water and some cryoprotectants are presented in Table 10. For keeping the dimension we assumed: e_4 – (dyn/cm) \times °C⁻⁴; e_3 – (dyn/cm) \times °C⁻³; e_2 – (dyn/cm) \times °C⁻²; e_1 – (dyn/cm) \times °C⁻¹; e_0 – dyn/cm. The similar dependence described only with a polynomial of the first degree is characteristic to

Таблица 9. Кинематическая вязкость некоторых веществ и их растворов
Table 9. Kinematic viscosity of some substances and their solutions

Вещество Substance	Концентрация, масс. % Concentration, % (w/w)	Температура, °C Temperature, °C	Кинематическая вязкость, сСт Kinematic viscosity, cSt	Источник Reference
ДЭГ DEG	100	21,1	32	[78]
ТЭГ TEG	100	21,1	40	[78]
Глицерин Glycerol	50	20	5,29	[78]
Этанол Ethanol	80	20	1,25	[40]
NaCl	25	15,6	2,4	[78]
CaCl ₂	5	18,3	1,156	[78]
CaCl ₂	25	15,6	4,0	[78]

Таблица 10. Коэффициенты уравнения (5) для расчета поверхностного натяжения воды и ряда чистых криопротекторов в зависимости от температуры; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнения

Table 10. Coefficients of equation (5) to calculate the surface tension of water and some pure cryoprotective agents depending on temperature; approximation dispersion and temperature ranges of equation application

Вещество Substance	$e_4, \times 10^{-8}$	$e_3, \times 10^{-6}$	$e_2, \times 10^{-4}$	e	e_0	R ²	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник Reference
Вода Water	3,357	-7,448	2,0185	-0,1487	75,683	0,9991	-40+130	[4,7,13,18,22,32,50,62]
Глицерин Glycerol	0	0	37,94	-0,4273	69,51	0,7186	15+60	[10,21,48,52,79,85]
Метанол Methanol	0	0	0	-0,0832	24,272	0,9916	0+60	[6,10,13,15,52,62,79,85]
Пропанол Propanol	0	0	0	-0,0783	25,306	0,9997	20+90	[13,15]
ТЭГ TEG	0	0	0	-0,088	47,33	0,999	20+150	[82]
ЭГ EG	0	0	-131	0,4735	43,84	0,7645	15+30	[51,79,80,84,85]
Этанол Ethanol	0	0	0	-0,0917	24,132	0,9798	0+60	[6,10,52,69,79]

Для определения поверхностного натяжения водных растворов криопротекторов в зависимости от их массовой концентрации используется полиномиальное уравнение:

$$\sigma = f_4 C^4 + f_3 C^3 + f_2 C^2 + f_1 C + f_0, \quad (6)$$

где коэффициенты $f_4 \div f_0$ имеют размерность дин/см и представлены в табл. 12.

Дополнительно к расчетным данным приводятся средние значения поверхностного натяжения различных криопротекторов и их растворов (табл. 13).

aqueous solutions of glycerol, which concentration is given in % (vol/vol). Table 11 represents e_1 and e_0 values.

To determine the surface tension of aqueous solutions of cryoprotective agents depending on their mass concentration the polynomial equation is used:

$$\sigma = f_4 C^4 + f_3 C^3 + f_2 C^2 + f_1 C + f_0, \quad (6)$$

where $f_4 \div f_0$ coefficients have dyne/cm dimension and are presented in the Table 12.

Additionally to the calculated data the average values of surface tension for different cryoprotective agents and their solutions are given (Table 13).

Таблица 11. Коэффициенты уравнения (5) для расчета поверхностного натяжения водных растворов глицерина при заданной объемной концентрации в зависимости от температуры; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнения

Table 11. Coefficients of equation (5) to calculate the surface tension of aqueous solutions of glycerol at given volumetric concentration depending on temperature; approximation dispersion and temperature ranges of equation application

Концентрация глицерина, объемные % Glycerol concentration, % (v/v)	e_1	e_0	R^2	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник Reference
10	-0,0458	71,235	1,0	- 1+40	[19]
20	-0,0616	70,619	0,9985	- 5+40	[19]
30	-0,0526	69,55	0,9987	- 10+40	[19]
40	-0,0489	68,088	1,0	- 15+40	[19]

Таблица 12. Коэффициенты уравнения (6) для расчета поверхностного натяжения ряда водных растворов криопротекторов в зависимости от концентрации при фиксированных температурах; дисперсии аппроксимаций и диапазоны концентраций применения уравнения

Table 12. Coefficients of equation (6) to calculate the surface tension of some aqueous solutions of cryoprotective agents depending on concentration at fixed temperatures; approximation dispersion and concentration ranges of equation application

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	$f_4, \times 10^{-6}$	$f_3, \times 10^{-5}$	$f_2, \times 10^{-3}$	f_1	f_0	R^2	Диапазон концентраций C, масс. % Concentration range, % (w/w)	Источник Reference
Амиды Amides									
ДМФА DMFA	26	0	0	0	-0,0324	37,149	0,9997	10+100	[45]
Водорастворимые полимеры Water soluble polymers									
ГОЭК HES	24	0	-17,88	9,695	-0,1685	72,12	0,8574	1+40	[90]
Декстран Dextran	24	0	0	0	-0,016	70,726	0,8442	1+30	[90]
ОЭГ n=1 OEG n=1	20	9,484	-87,16	29,88	-0,5449	70,91	0,9857	0,5+30	[1,2]
ОЭГ n=2 OEG n=2	20	15,14	-118,5	36,663	-0,6729	70,94	0,9864	0,5+30	[1,2]
ОЭГ n=3 OEG n=3	20	0	-27,54	18,45	-0,5358	70,46	0,9862	0,5+30	[2]
ОЭГ n=5 OEG n=5	20	0	-45,27	25,09	-0,5751	70,3	0,9999	0,5+30	[17,21]
ОЭГ n=10 OEG n=10	20	0	-38,44	15,82	-0,2808	65,99	0,902	1+30	[1,2]
ОЭГ n=20 OEG n=20	20	0	-31,03	13,51	-0,2857	65,09	0,9669	0,5+30	[2]
ОЭГ n=30 OEG n=30	20	64,67	-443,3	96,58	-0,8342	66,27	0,8763	5+30	[1,21]
ПВП (м.м. 10000) PVP (mol. weight 10000)	24	0	-69,3	24,94	-0,3191	68,86	0,8452	1+20	[90]

Продолжение на следующей странице.
Next page to be continued.

Продолжение табл. 12
Table 12. (Continued from the previous page)

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	$f_4, \times 10^{-6}$	$f_3, \times 10^{-5}$	$f_2, \times 10^{-3}$	f_1	f_0	R ²	Диапазон концентраций С, масс. % Concentration range, % (w/w)	Источник Reference
Водорастворимые полимеры Water soluble polymers									
ПЭО-100 PEO-100	20	0	0	13,31	-0,9241	72,93	0,9975	1+30	[1,14]
ПЭО-400 PEO-400	20	0	0	1,197	-0,309	69	0,9687	1+100	[1,14,21]
ПЭО-500 PEO-500	20	0	0	17,78	-0,6345	72,27	0,9582	1+20	[14]
ПЭО-4000 PEO-4000	20	0	0	4,662	-0,2571	67,47	0,9858	1+30	[1,14,21]
Оксиды Oxides									
DMCO DMSO	24	0	0	0	-0,2587	70,106	0,9956	1+100	[90]
Спирты Alcohols									
Глицерин Glycerol	24	0	0	-0,3267	-5,24	72	0,9938	1+100	[90]
ТЭГ TEG	25	0	-1,522	4,2399	-0,5343	72,1	0,999	0+100	[82]
ЭГ EG	30	0	-1,242	2,88	-0,414	71,2	0,9815	0+100	[57]
1,3-БД 1,3-BD	30	1,876	-46,55	40,86	-1,624	71,2	0,9924	0+100	[57]
1,4-БД 1,4-BD	30	1,487	-36,3	31,08	-1,236	71,2	0,9956	0+100	[56]
1,2-ПД 1,2-PD	30	0	-5,836	12,65	-1,048	71,2	0,9926	0+100	[57]
1,3-ПД 1,3-PD	30	1,015	-26,91	24,76	-1,043	71,2	0,9884	0+100	[57]
Углеводы Carbohydrates									
M100	25	0	0	-0,4	-0,0008	71,43	0,9987	5+20	[23]
M150	25	0	0	0,02857	0,01757	71,39	0,9944	5+35	[23]
M200	25	0	0	-0,3	0,0321	71,43	0,9999	5+20	[23]
Сахароза Sucrose	24	0	0	0	0,0438	71,453	0,9978	1+80	[23,90]
	25	0	0	0	0,0354	71,328	0,9758	5+40	

Таблица 13. Поверхностное натяжение некоторых криопротекторов и их растворов
Table 13. Surface tension of some cryoprotective agents and their solutions

Вещество Substance	Концентрация, объемные % Concentration, % (v/v)	Температура, °С Temperature, °С	Поверхностное натяжение, дин/см Surface tension, din/cm	Источник Reference
ДМАц DMAc	100	20	35,35	[79]
		20	44,73	[10,14]
ДМСО DMSO	100	23,7	43	[24]
		25	42,98	[10,14]
ДФА DMFA	100	20	36,7	[6,79,85]
МАц MAc	100	37	33,7	[6]
ПЭГ-400 PEG-400	100	20	43,5	[79]
ТЭГ TEG	100	25	45,1	[6]
Формаид Formamide	100	20	58,4	[6,79,85]
		23,7	57	[24]
1,2-ПД 1,2-PD	100	25	37	[72,80]
	50	25	45	[80]
ЭГ EG	50	25	56	[80]

Литература

1. *Актуальные проблемы криобиологии* / Под общ. ред. Н.С. Пушкаря и А.М. Белоуса.– Киев: Наук. думка, 1981.– 608 с.
2. *Белоус А.М., Шраго М.И., Пушкарь Н.С.* Криоконсерванты.– Киев: Наук. думка, 1979.– 198 с.
3. *Богданов Н.С., Иванов О.П., Куприянова А.В.* Холодильная техника. Свойства веществ. Справочник.– М.: Агропромиздат, 1985.– 208 с.
4. *Варгафтик Н.Б., Волков Б.Н., Воляк Л.Д.* О международных таблицах поверхностного натяжения воды // *Теплоэнергетика*.– 1979.– N5.– С. 73–74.
5. *Кавешников А.И., Суев А.В.* Измерения вязкости крови при разведении ее различными кровезаменителями в условиях гипотермии // *Патологическая физиология и экспериментальная терапия*.– 1971.– Т. 15, N1.– С. 70–75.
6. *Карапетян Ю.А., Эйчис В.М.* Физико-химические свойства электролитных неводных растворов.– М.: Химия, 1989.– 256 с.
7. *Коверда В.П., Скрипов В.П.* О температурной зависимости теплоемкости переохлажденной воды // *Журнал физической химии*.– 1978.– Т. 52, N4.– С. 1041–1043.
8. *Компаниец А.М., Николенко А.В., Кошций С.В., Иванова И.А.* Монометилловый эфир глицерина: цитотоксичность и криозащитная эффективность при замораживании тромбоцитов // *Физико-химические свойства и биологическое действие криопротекторов: Сб. статей* / Под ред. В.И.Лугового.– Харьков, 1990.– С. 59–63.
9. *Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г.* Справочник по элементарной физике.– М.: Наука, 1982.– 208 с.

References

1. *Actual tasks of cryobiology* / Ed. by N.S. Pushkar and A.M. Belous.– Kiev: Naukova dumka, 1981.– 608 p.
2. *Belous A.M., Shrago M.I., Pushkar N.S.* Cryopreservatives.– Kiev: Naukova dumka, 1979.– 198p.
3. *Bogdanov N.S., Ivanov O.P., Kupriyanova A.V.* Refrigerating apparatuses. Properties of substances. Reference book.– Moscow: Agropromizdat, 1985.– 208 p.
4. *Vargaftik N.B., Volkov B.N., Volyak L.D.* About international tables of surface tension of water // *Teploenergetica*.– 1979.– N5.– P. 73–74.
5. *Kaveshnikov A.I., Suev A.V.* Measurements of blood viscosity at its dilution with different blood substances under hypothermia // *Patologicheskaya fiziologiya i eksperimental'naya terapiya*.– 1971.– Vol. 15, N1.– P. 70–75.
6. *Karapetyan Yu.A., Eychis V.M.* Physical and chemical properties of electrolyte non-aqueous solutions.– Moscow: Khimiya, 1989.– 256 p.
7. *Koverda V.P., Skripov V.P.* About temperature dependence of thermal capacity of overcooled water // *Zhurnal Fizicheskoy Khimii*.– 1978.– Vol. 52, N4.– P. 1041–1043.
8. *Kompaniets A.M., Nikolenko A.V., Koschiy S.V., Ivanova I.A.* Methyl ether of glycerol: cytotoxicity and cryoprotective efficiency during freezing of platelets // In: *Physical and chemical properties and biological effect of cryoprotectants* / Ed. by V.I. Lugovoy.– Kharkov, 1990.– P. 59–63.
9. *Koshkin N.I., Shirkevich M.G.* Reference book on elementary physics.– Moscow: Nauka, 1982.– 208 p.
10. *Brief Reference Book of Physical and Chemical Values* / Ed. by A.A. Ravidel' and A.M. Ponomareva.– Leningrad: Khimiya, 1983.– 232 p.

10. *Краткий справочник физико-химических величин* / Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой. – Л.: Химия, 1983. – 232 с.
11. Куликов М.В., Крестов А.Г., Сафонова Л.П., Колкер А.М. Избыточные термодинамические функции систем вода N-метилформамид вода - N,N - диметилформамид при 308,15 K // Термодинамика растворов неэлектролитов. – Л.: Химия, 1989. – С. 27–32.
12. *Нефть-газ*. Электронная библиотека [Электронный документ] // [веб-сайт] www.oglib.ru/tab1/index.html (17.05.2010)
13. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.
14. Пушкарь Н.С., Шраго М.И., Белоус А.М. Криопротекторы. – Киев: Наук. думка, 1978. – 204 с.
15. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
16. *Справочник по физико-техническим основам криогеники* / Под ред. М.П. Малкова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
17. *Таблицы физических величин*. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
18. *Теплотехнический справочник*. Т.2 / Под ред. В.Н. Юрнева и П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976. – 896 с.
19. Тодрин А.Ф. Об измерении поверхностного натяжения водных растворов глицерина и плазмы крови // Моделирование криобиологических процессов: Сб. статей. – Харьков, 1988. – С. 142–145.
20. Тодрин А.Ф., Попивненко Л.И., Коваленко С.Е. Теплофизические свойства криопротекторов. II. Динамическая вязкость ряда криопротекторов, их растворов и смесей // Проблемы криобиологии. – 2010. – Т. 20, №3. – С. 266–281.
21. Шраго М.И., Гучок М.М., Калугин Ю.В. Спрямоаний синтез і комплексне вивчення криопротекторів // Вісник АН УРСР. – 1980. – №9. – С. 35–40.
22. Brodkey R.S., Hershey H.C. Transport phenomena: a unified approach. – Columbus: Brodkey Publishing, 2003. – 516 p.
23. Carvajal P.A., MacDonald G.A., Lanier T.C. Cryostabilization mechanism of the fish muscle proteins by maltodextrins // Cryobiology. – 1999. – Vol. 38, N1. – P. 16–26.
24. Chatterjee D., Hetayothin B., Wheeler A.R. et al. Droplet-based microfluidics with nonaqueous solvents and solutions // Lab Chip. – 2006. – Vol. 6, N2. – P. 199–206.
25. *Chem Group Incorporated* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.chem-group.com (20.01.2011).
26. *Chemical.net*. [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://chemical.net/home/Defaults.asp> (20.01.2010).
27. Cobos D. Using the KD2 to measure thermal conductivity of fluids [Электронный документ] // [веб-сайт] www.decagon.com/appnotes/UsingtheKD2toMeasureThermalConductivity.pdf (25.10.2009).
28. Cowie J.M.G., Toporowski P.M. Association in the binary liquid system dimethyl sulphoxide - water // Can. J. Chem. – 1961. – Vol. 39, N11. – P. 2240–2243.
29. *CRC handbook of chemistry and physics*. 69th edition, 1988-1989 / Ed. by R.C. Weast. – Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc., 1988. – 427 p.
30. Crombie D.S., Hipkins M.F., Milburn J.A. Gas penetration of pit membranes in the xylem of Rhododendron as the cause of acoustically detectable sap cavitation // Aust. J. Plant Physiol. – 1985. – Vol. 12, N5. – P. 445–453.
31. Diller K.R. The influence of controlled ice nucleation on regulating the thermal history during freezing // Cryobiology. – 1985. – Vol. 22, N3. – P. 268–281.
32. *Dimethylacetamide* [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://chemicalland21.com/industrialchem/solalc/n,n-DIMETHYLACETAMIDE.htm> (25.04.2009).
33. Elert G. The physics hypertextbook [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
34. Elert G. The physics hypertextbook [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
35. Elert G. The physics hypertextbook [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
36. Elert G. The physics hypertextbook [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
37. Elert G. The physics hypertextbook [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
38. Elert G. The physics hypertextbook [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
39. Elert G. The physics hypertextbook [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
40. Elert G. The physics hypertextbook [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
41. Kulikov M.V., Krestov A.G., Safonova L.P., Kolker A.M. Excessive thermo-dynamical functions of water N-methyl formamide and water-N,N-dimethyl formamide systems at 308;15 K // In: Thermodynamics of non-electrolytes solutions. – Leningrad: Khimiya, 1989. – P. 27–32.
42. *Oil-gas* [Electronic resource] // [web-site] www.oglib.ru/tab1/index.html (17.05.2010).
43. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. Examples and tasks on the course of the processes and apparatuses of chemical technology. – Leningrad: Khimiya, 1987. – 576 p.
44. Pushkar N.S., Shrago M.I., Belous A.M. Cryoprotectants. – Kiev: Naukova dumka, 1978. – 204 p.
45. Reid R., Prausnitz J., Sherwood T. Properties of gases and fluids: Reference book. – Leningrad: Khimiya, 1982. – 592 p.
46. *Reference Book on Physical and Technical basics of cryogenics* / Ed. by M.P. Malkova. – Moscow: Energoatomizdat, 1985. – 432 p.
47. *Tables of physical values. Reference book* / Ed. by I.K. Kikoin. – Moscow: Atomizdat, 1976. – 1008 p.
48. *Thermotechnical reference book*. Vol. 2 / Ed. by V.N. Yurenev and P.D. Lebedev. – Moscow: Energiya, 1976. – 896 p.
49. Todorin A.F. About change of surface tension of aqueous solutions of glycerol and blood plasma // In: Simulation of cryobiological processes. – Kharkov, 1988. – P. 142–145.
50. Todorin A.F., Popivnenko L.I., Kovalenko S.E. Thermophysical properties of cryoprotective agents. II. Dynamic viscosity of some cryoprotective agents, their solutions and mixtures // Problems of Cryobiology. – 2010. – Vol. 20, N3. – P. 266–281.
51. Shrago M.I., Guchok M.M., Kalugin Yu.V. Directed synthesis and complex study of cryoprotectants // Visnyk AN UkrSSR. – 1980. – №9. – P. 35–40.
52. Brodkey R.S., Hershey H.C. Transport phenomena: a unified approach. – Columbus: Brodkey Publishing, 2003. – 516 p.
53. Carvajal P.A., MacDonald G.A., Lanier T.C. Cryostabilization mechanism of the fish muscle proteins by maltodextrins // Cryobiology. – 1999. – Vol. 38, N1. – P. 16–26.
54. Chatterjee D., Hetayothin B., Wheeler A.R. et al. Droplet-based microfluidics with nonaqueous solvents and solutions // Lab Chip. – 2006. – Vol. 6, N2. – P. 199–206.
55. *Chem Group Incorporated* [Electronic resource] / [web-site] www.chem-group.com (20.01.2011).
56. *Chemical.net*. [Electronic resource] // [web-site] <http://chemical.net/home/Defaults.asp> (20.01.2010).
57. Cobos D. Using the KD2 to measure thermal conductivity of fluids [Electronic resource] // [web-site] www.decagon.com/appnotes/UsingtheKD2toMeasureThermalConductivity.pdf (25.10.2009).
58. Cowie J.M.G., Toporowski P.M. Association in the binary liquid system dimethyl sulphoxide - water // Can. J. Chem. – 1961. – Vol. 39, N11. – P. 2240–2243.
59. *CRC handbook of chemistry and physics*. 69th edition, 1988-1989 / Ed. by R.C. Weast. – Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc., 1988. – 427 p.
60. Crombie D.S., Hipkins M.F., Milburn J.A. Gas penetration of pit membranes in the xylem of Rhododendron as the cause of acoustically detectable sap cavitation // Aust. J. Plant Physiol. – 1985. – Vol. 12, N5. – P. 445–453.
61. Diller K.R. The influence of controlled ice nucleation on regulating the thermal history during freezing // Cryobiology. – 1985. – Vol. 22, N3. – P. 268–281.
62. *Dimethylacetamide* [Electronic resource] // [web-site] <http://chemicalland21.com/industrialchem/solalc/n,n-DIMETHYLACETAMIDE.htm> (25.04.2009).
63. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
64. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
65. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
66. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
67. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
68. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
69. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
70. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
71. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
72. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
73. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
74. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
75. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
76. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
77. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
78. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
79. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
80. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
81. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
82. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
83. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
84. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
85. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
86. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
87. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
88. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
89. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
90. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
91. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
92. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
93. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
94. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
95. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
96. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
97. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
98. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
99. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).
100. Elert G. The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (03.06.2010).

34. *Eliassi A., Modarress H.* Densities of poly(ethylene glycol) + water mixtures in the 298.15–328.15 K temperature range // *J. Chem. Eng. Data.*– 1998.– Vol. 43, N5.– P. 719–721.
35. *Figura L.O., Teixeira A.A.* Food physics. Physical properties – measurement and applications.– New York: Springer, 2007.– 550 p.
36. *Flick E.W.* Industrial solvent handbook.– Westwood: William Andrew, 1998.– 963 p.
37. *Foroutan M.* Density dependence of the viscosity and excess volume of aqueous solutions of polyvinylpyrrolidone // *Acta Chim. Slov.*– 2006.– Vol. 53, N2.– P. 219–222.
38. *Gaylord Chemical Company LLC.* Dimethyl Sulfoxid (DMSO). Physical properties [Электронный документ] // [веб-сайт] www.gaylordchemical.com/bulletins
39. *van Gelder M.F.* A thermistor based method for measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of moist food materials at high temperatures: Thesis ... of doctor of philosophy in Biological Systems Engineering.– Blackburg, Virginia, 1998.– 160 p.
40. *Goel M., Roy S.K., Senguptas S.* Laminar forced convection heat transfer in microcapsulated phase change material suspensions // *Inf. J. Heal Mass Transfer.*– 1994.– Vol. 37, N4.– P. 593–604.
41. *Haddadin R.* Accuracy of Brookfield and capillary viscometers for newtonian viscosity determination [Электронный документ] // [веб-сайт] www.seas.upenn.edu/courses/belab/LabProjects/2002/be309f02m3p1.doc (7.12.2009).
42. *Han F., Zhang J., Chen G., Wei X.* Density, viscosity, and excess properties for aqueous poly(ethylene glycol) solutions from (298.15 to 323.15) K // *J. Chem. Eng. Data.*– 1998.– Vol. 53, N11.– P. 2598–2601.
43. *Hare D.E., Sorensen C.M.* The density of supercooled water. II. Bulk samples cooled to the homogeneous nucleation limit // *J. Chem. Phys.*– 1987.– Vol. 87, N8.– P. 4840–4845.
44. *Huck J., Dufour J., Bondeau A.* Density of supercooled glycerol-water solutions // 9th International conference on conduction and breakdown in dielectric liquids.– 1987.– New York, 1987.– P. 240–244.
45. *Jarusuwannapoom T., Hongrojjanawiwat W., Jitjaicham S. et al.* Effect of solvents on electro-spinnability of polysterene solutions and morphological appearance of resulting electro-spun polysterene fibers // *Eur. Polym. J.*– 2005.– Vol. 41, N3.– P. 409–421.
46. *Josens R.B., Farina W.M.* Nectar feeding by the hovering hawk moth *Macroglossum stellatarum*: intake rate as a function of viscosity and concentration of sucrose solutions // *J. Comp. Physiol. A.*– 2001.– Vol. 187, N8.– P. 661–665.
47. *Kawaizumi F., Ohno M., Miyahara Y.* Ultrasonic and volumetric investigation of aqueous solutions of amides // *Bull. Chem. Soc. Jpn.*– 1977.– Vol. 50, N9.– P. 2229–2233.
48. *Kaye & Laby Tables of physical and chemical constants.* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.kayelab.npl.co.uk/toc/ (12.08.2010).
49. *Kestin J., Khalifa H.E., Correia R.J.* Tables of the dynamic and kinematic viscosity of aqueous NaCl solutions in the temperature range 20–150°C and the pressure 0,1–35 MPa // *J. Phys. Chem. Ref. Data.*– 1981.– Vol. 10, N1.– P. 71–87.
50. *Kratochvil A., Hrnecir E.* Correlation between the blood surface tension and the activity of some enzymes // *Physiol. Res.*– 2001.– Vol. 50, N4.– P. 433–437.
51. *Laque W.E., Ronneberg C.E.* A study of the decarboxylation of trichloroacetic acid in solution of water and dimethylsulfoxide // *Ohio Journal of Science.*– 1970.– Vol. 70, N2.– P. 97–106.
52. *Martinez I.* Thermodynamics of solution [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c07sol/solutions.htm> (4.04.2010).
53. *McDonald E.J., Turcotte A.L.* Density and refractive indices of lactose solutions // *J. Res. Natl. Bur. Stand.*– 1948.– Vol. 41, N7.– P. 63–68.
54. *Flick E.W.* Industrial solvent handbook.– Westwood: William Andrew, 1998.– 963 p.
55. *Foroutan M.* Density dependence of the viscosity and excess volume of aqueous solutions of polyvinylpyrrolidone // *Acta Chim. Slov.*– 2006.– Vol. 53, N2.– P. 219–222.
56. *Gaylord Chemical Company LLC.* Dimethyl Sulfoxid (DMSO). Physical properties [Electronic resource] // [web-site] www.gaylordchemical.com/bulletins.
57. *van Gelder M.F.* A thermistor based method for measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of moist food materials at high temperatures: Thesis ... of doctor of philosophy in Biological Systems Engineering.– Blackburg, Virginia, 1998.– 160 p.
58. *Goel M., Roy S.K., Senguptas S.* Laminar forced convection heat transfer in microcapsulated phase change material suspensions // *Inf. J. Heal Mass Transfer.*– 1994.– Vol. 37, N4.– P. 593–604.
59. *Haddadin R.* Accuracy of Brookfield and capillary viscometers for newtonian viscosity determination [Electronic resource] // [web-site] www.seas.upenn.edu/courses/belab/LabProjects/2002/be309f02m3p1.doc (7.12.2009).
60. *Han F., Zhang J., Chen G., Wei X.* Density, viscosity, and excess properties for aqueous poly(ethylene glycol) solutions from (298.15 to 323.15) K // *J. Chem. Eng. Data.*– 1998.– Vol. 53, N11.– P. 2598–2601.
61. *Hare D.E., Sorensen C.M.* The density of supercooled water. II. Bulk samples cooled to the homogeneous nucleation limit // *J. Chem. Phys.*– 1987.– Vol. 87, N8.– P. 4840–4845.
62. *Huck J., Dufour J., Bondeau A.* Density of supercooled glycerol-water solutions // 9th International conference on conduction and breakdown in dielectric liquids.– 1987.– New York, 1987.– P. 240–244.
63. *Jarusuwannapoom T., Hongrojjanawiwat W., Jitjaicham S. et al.* Effect of solvents on electro-spinnability of polysterene solutions and morphological appearance of resulting electro-spun polysterene fibers // *Eur. Polym. J.*– 2005.– Vol. 41, N3.– P. 409–421.
64. *Josens R.B., Farina W.M.* Nectar feeding by the hovering hawk moth *Macroglossum stellatarum*: intake rate as a function of viscosity and concentration of sucrose solutions // *J. Comp. Physiol. A.*– 2001.– Vol. 187, N8.– P. 661–665.
65. *Kawaizumi F., Ohno M., Miyahara Y.* Ultrasonic and volumetric investigation of aqueous solutions of amides // *Bull. Chem. Soc. Jpn.*– 1977.– Vol. 50, N9.– P. 2229–2233.
66. *Kaye & Laby Tables of physical and chemical constants.* [Electronic resource] // [web-site] www.kayelab.npl.co.uk/toc/ (12.08.2010).
67. *Kestin J., Khalifa H.E., Correia R.J.* Tables of the dynamic and kinematic viscosity of aqueous NaCl solutions in the temperature range 20–150°C and the pressure 0,1–35 MPa // *J. Phys. Chem. Ref. Data.*– 1981.– Vol. 10, N1.– P. 71–87.
68. *Kratochvil A., Hrnecir E.* Correlation between the blood surface tension and the activity of some enzymes // *Physiol. Res.*– 2001.– Vol. 50, N4.– P. 433–437.
69. *Laque W.E., Ronneberg C.E.* A study of the decarboxylation of trichloroacetic acid in solution of water and dimethylsulfoxide // *Ohio Journal of Science.*– 1970.– Vol. 70, N2.– P. 97–106.
70. *Martinez I.* Thermodynamics of solution [Electronic resource] // [web-site] <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c07sol/solutions.htm> (4.04.2010).
71. *McDonald E.J., Turcotte A.L.* Density and refractive indices of lactose solutions // *J. Res. Natl. Bur. Stand.*– 1948.– Vol. 41, N7.– P. 63–68.
72. *METTLER TOLEDO* [Electronic resource] // [web-site] www.us.mt.com/home (23.05.2010).
73. *Mexal J., Fisher J.T., Osteryoung J., Reid C.P.P.* Oxygen availability in polyethylene glycol solutions and its implications in plant-water relations // *Plant physiol.*– 1975.– Vol. 55, N1.– P. 20–24.

54. *METTLER TOLEDO* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.us.mt.com/home (23.05.2010).
55. *Mexal J., Fisher J.T., Osteryoung J., Reid C.P.P.* Oxygen availability in polyethylene glycol solutions and its implications in plant-water relations // *Plant physiol.*– 1975.– Vol. 55, N1.– P. 20–24.
56. *Molinero V., Cagin T., Goddard W.A. III.* Sugar, water and free volume networks in concentrated sucrose solution // *Chem. Phys. Lett.*– 2003.– Vol. 377, N3–4.– P. 469–474.
57. *Nakanishi K., Matsumoto T., Hayatsu M.* Surface tension of aqueous solutions of some glycols // *J. Chem. Eng. Data.*– 1971.– Vol. 16, N1.– P. 44–45.
58. *Noda K., Ohashi M., Ishida K.* Viscosities and densities at 298.15 K for mixtures of methanol, acetone, and water // *J. Chem. Eng. Data.*– 1982.– Vol. 27, N3.– P. 326–328.
59. *Okutomi T., Nemoto M., Mishiba E., Goto F.* Viscosity of diluent and sensory level of subarachnoid anaesthesia achieved with tetracaine // *Can. J. Anaesth.*– 1998.– Vol. 45, N1.– P. 84–86.
60. *Polyvinylpyrrolidone* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.camd.lsu.edu/msds/p/polyvinylpyrrolidone.htm (9.08.2009).
61. *Radhakrishnan S.* Measurement of thermal properties of seafood / Thesis ... Master of Science in Biological Systems Engineering.– Blackburg, Virginia, 1997.– 83 p.
62. *Rao B.G., Singh U.C.* A free energy perturbation study of solvation in methanol and dimethyl sulfoxide // *J. Am. Chem. Soc.*– 1990.– Vol. 112, N10.– P. 3803–3811.
63. *Rastogi P.P.* Ion-solvent interaction of tetraalkylammonium and some common ions in N-methylformamide from viscosity data // *Bull. Chem. Soc. Jpn.*– 1970.– Vol. 43, N12.– P. 2442–2444.
64. *Regmi S.* Study and estimation of temperature dependent physical parameters of poly(vinylidene fluoride) and poly(1,4 butylene adipate) dissolved in N,N-dimethyl formamide // *J. Sci. Eng. Tech.*– 2007.– Vol. I, NIII.– P. 1–10.
65. *Roy R.N., Baker G.E., Hoffman T. et al.* Standard electrode potentials of silver-silver chloride electrodes in 20, 30, and 50% (w/w) ethylene glycol/water from 25°C to –20°C pK2 and pH* values of the physiological buffer "BES" in 50% (w/w) ethylene glycol/water // *Cryo-Letters.*– 1988.– Vol. 9, N3.– P. 172–185.
66. *Roy R.N., Gibbons J.J., Baker G., Bates R.G.* Standard electromotive force of the H₂-AgCl/AgCl in 30, 40, and 50 mass.% dimethyl sulfoxide/water from –20 to 25°C: pK2 and pH values for a standard "Bicine" buffer solutions at subzero temperatures // *Cryobiology.*– 1984.– Vol. 21, N6.– P. 672–681.
67. *Saleh J.M., Khalil M., Hokmat N.A.* Investigation of some physical properties of glycerol- water mixtures at 298.15 K // *J. Iraqi Chem. Soc.*– 1986.– Vol.11, N1.– P. 89–104.
68. *Saluja A., Kalonia D.S.* Measurement of fluid viscosity at microliter volumes using quartz // *AAPS Pharm. Sci. Tech.*– 2004.– Vol. 5, N3.– P. 1–14.
69. *Schonherr J., Bucovac M.J.* Penetration of stomata by liquids. Dependence on surface tension, wettability, and stomatal morphology // *Plant Physiol.*– 1972.– Vol. 49, N5.– P. 813–819.
70. *Sears P.G., Siegfried W.D., Sands D.E.* Viscosities, densities, and related properties of solutions of some sugars in dimethyl sulfoxide // *J. Chem. Eng. Data.*– 1964.– Vol. 9, N2.– P. 261–263.
71. *Sengers J.V., Kamgar-Parsi B.* Representative equations for the viscosity of water substance // *J. Phys. Chem. Ref. Data.*– 1984.– Vol. 13, N1.– P. 185–205.
72. *Shell Chemical* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.shell.com (11.06.2010).
73. *Shih W.Y., Li X., Gu H., Shih W.-H., Aksay I.A.* Simultaneous liquid viscosity and density determination with piezoelectric unimorph cantilevers // *J. Appl. Phys.*– 2001.– Vol. 89, N2.– P. 1497–1505.
74. *Molinero V., Cagin T., Goddard W.A. III.* Sugar, water and free volume networks in concentrated sucrose solution // *Chem. Phys. Lett.*– 2003.– Vol. 377, N3–4.– P. 469–474.
75. *Nakanishi K., Matsumoto T., Hayatsu M.* Surface tension of aqueous solutions of some glycols // *J. Chem. Eng. Data.*– 1971.– Vol. 16, N1.– P. 44–45.
76. *Noda K., Ohashi M., Ishida K.* Viscosities and densities at 298.15 K for mixtures of methanol, acetone, and water // *J. Chem. Eng. Data.*– 1982.– Vol. 27, N3.– P. 326–328.
77. *Okutomi T., Nemoto M., Mishiba E., Goto F.* Viscosity of diluent and sensory level of subarachnoid anaesthesia achieved with tetracaine // *Can. J. Anaesth.*– 1998.– Vol. 45, N1.– P. 84–86.
78. *Polyvinylpyrrolidone* [Electronic resource] // [web-site] www.camd.lsu.edu/msds/p/polyvinylpyrrolidone.htm (9.08.2009).
79. *Radhakrishnan S.* Measurement of thermal properties of seafood / Thesis ... Master of Science in Biological Systems Engineering.– Blackburg, Virginia, 1997.– 83 p.
80. *Rao B.G., Singh U.C.* A free energy perturbation study of solvation in methanol and dimethyl sulfoxide // *J. Am. Chem. Soc.*– 1990.– Vol. 112, N10.– P. 3803–3811.
81. *Rastogi P.P.* Ion-solvent interaction of tetraalkylammonium and some common ions in N-methylformamide from viscosity data // *Bull. Chem. Soc. Jpn.*– 1970.– Vol. 43, N12.– P. 2442–2444.
82. *Regmi S.* Study and estimation of temperature dependent physical parameters of poly(vinylidene fluoride) and poly(1,4 butylene adipate) dissolved in N,N-dimethyl formamide // *J. Sci. Eng. Tech.*– 2007.– Vol. I, NIII.– P. 1–10.
83. *Roy R.N., Baker G.E., Hoffman T. et al.* Standard electrode potentials of silver-silver chloride electrodes in 20, 30, and 50% (w/w) ethylene glycol/water from 25°C to –20°C pK2 and pH* values of the physiological buffer "BES" in 50% (w/w) ethylene glycol/water // *Cryo-Letters.*– 1988.– Vol. 9, N3.– P. 172–185.
84. *Roy R.N., Gibbons J.J., Baker G., Bates R.G.* Standard electromotive force of the H₂-AgCl/AgCl in 30, 40, and 50 mass.% dimethyl sulfoxide/water from –20 to 25°C: pK2 and pH values for a standard "Bicine" buffer solutions at subzero temperatures // *Cryobiology.*– 1984.– Vol. 21, N6.– P. 672–681.
85. *Saleh J.M., Khalil M., Hokmat N.A.* Investigation of some physical properties of glycerol- water mixtures at 298.15 K // *J. Iraqi Chem. Soc.*– 1986.– Vol.11, N1.– P. 89–104.
86. *Saluja A., Kalonia D.S.* Measurement of fluid viscosity at microliter volumes using quartz // *AAPS Pharm. Sci. Tech.*– 2004.– Vol. 5, N3.– P. 1–14.
87. *Schonherr J., Bucovac M.J.* Penetration of stomata by liquids. Dependence on surface tension, wettability, and stomatal morphology // *Plant Physiol.*– 1972.– Vol. 49, N5.– P. 813–819.
88. *Sears P.G., Siegfried W.D., Sands D.E.* Viscosities, densities, and related properties of solutions of some sugars in dimethyl sulfoxide // *J. Chem. Eng. Data.*– 1964.– Vol. 9, N2.– P. 261–263.
89. *Sengers J.V., Kamgar-Parsi B.* Representative equations for the viscosity of water substance // *J. Phys. Chem. Ref. Data.*– 1984.– Vol. 13, N1.– P. 185–205.
90. *Shell Chemical* [Electronic resource] // [web-site] www.shell.com (11.06.2010).
91. *Shih W.Y., Li X., Gu H., Shih W.-H., Aksay I.A.* Simultaneous liquid viscosity and density determination with piezoelectric unimorph cantilevers // *J. Appl. Phys.*– 2001.– Vol. 89, N2.– P. 1497–1505.
92. *Simetric.co.uk* [Electronic resource] // [web-site] www.simetric.co.uk/si_liquids.htm (11.06.2010)
93. *Simmonds C.* Alcohol, its production, properties, chemistry, and industrial applications [Electronic resource] / [web-site] <http://chestofbooks.com/food/beverages/Alcohol-Propeties/index.html> (11.01.2010).

74. *Simetric.co.uk* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.simetric.co.uk/si_liquids.htm (11.06.2010).
75. *Simmonds C.* Alcohol, its production, properties, chemistry, and industrial applications [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://chestofbooks.com/food/beverages/Alcohol-Properties/index.html> (11.01.2010).
76. *Smadel J.E., Pickels E.G., Shedlovsky T.* Ultracentrifugation studies on the elementary bodies of vaccine virus. II. The influence of sucrose, glycerol, and urea solutions on the physical nature of vaccine virus // *JEM.*– 1938.– Vol. 68, N4.– P. 607–627.
77. *Solvay Chemicals Worldwide* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.solvaychemicals.com.
78. *Specific gravity and viscosity of liquids* / CSG Network.com. Free information [Электронный документ] // [веб-сайт] www.scgnetwork.com (5.05.2010).
79. *Surface tension values of some common test liquids for surface energy analysis* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.surface-tension.de/index.html (5.05.2010).
80. *Technology lubricant corporation.* A comparison of ethylene glycol and propylene glycol [Электронный документ] // [веб-сайт] www.technologylubricants.com (5.05.2010).
81. *Tezze A.A., Farina W.M.* Trophallaxis in the honeybee, *Apis mellifera*: the interaction between viscosity and sucrose concentration of the transferred solution // *Animal Behaviour.*– 1999.– Vol. 57, N6.– P. 1319–1326.
82. *The dow chemical company* [Electronic resource] / [web-site] www.dow.com/ (11.01.2010)
83. *The engineering tool box* [Electronic resource] / [web-site] www.engineeringtoolbox.com (7.09.2010)
84. *Toegel R., Luther S., Lohse D.* Viscosity destabilizes sonoluminescing bubbles // *Phys. Rev. Lett.*– 2006.– Vol. 96, N11.– P. 1143011–1143014.
85. *Tracton A.A.* Coatings technology handbook.– Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.– 936 p.
86. *Uedaira H., Uedaira H.* Activity coefficients of aqueous xylose and maltose solutions // *Bull. Chem. Soc. Jpn.*– 1969.– Vol. 42, N11.– P. 2137–2140.
87. *Uribe S., Sampedro J.G.* Measuring solution viscosity and its effect on enzyme activity // *Biol. Proced. Online.*– 2003.– Vol. 5, N1.– P. 108–115.
88. *Venables D.S., Schmuttenmaer C.A.* Spectroscopy and dynamics of mixtures of water with acetone, acetonitrile, and methanol // *J. Chem. Phys.*– 2000.– Vol. 113, N24.– P. 11222–11236.
89. *Wensink E.J.W., Hoffmann A.C.* Dynamic properties of water/alcohol mixtures studied by computer simulation // *J. Chem. Phys.*– 2003.– Vol. 119, N14.– P. 7308–7317.
90. *Williams R.J., Harris D.* The distribution of cryoprotective agents into lipid interface // *Cryobiology.*– 1977.– Vol. 14, N6.– P. 670–680.
91. *Xie G., Timasheff S.N.* Mechanism of the stabilization of ribonuclease A by sorbitol: preferential hydration is greater for the denatured than for the native protein // *Protein science.*– 1997.– Vol. 6, N1.– P. 211–221.
92. *Yang C., Ma P., Tang D., Jin F.* Excess molar volume, viscosity and heat capacity for the mixture of 1,2-propanediol-water at different temperatures // *Chinese J. Chem. Eng.*– 2003.– Vol. 11, N2.– P. 175–180.
76. *Smadel J.E., Pickels E.G., Shedlovsky T.* Ultracentrifugation studies on the elementary bodies of vaccine virus. II. The influence of sucrose, glycerol, and urea solutions on the physical nature of vaccine virus // *JEM.*– 1938.– Vol. 68, N4.– P. 607–627.
77. *Solvay Chemicals Worldwide* [Electronic resource] // [web-site] www.solvaychemicals.com.
78. *Specific gravity and viscosity of liquids* / CSG Network.com. Free information [Electronic resource] // [web-site] www.scgnetwork.com (5.05.2010).
79. *Surface tension values of some common test liquids for surface energy analysis* [Electronic resource] // [web-site] www.surface-tension.de/index.html (5.05.2010).
80. *Technology lubricant corporation.* A comparison of ethylene glycol and propylene glycol [Electronic resource] // [web-site] www.technologylubricants.com (5.05.2010).
81. *Tezze A.A., Farina W.M.* Trophallaxis in the honeybee, *Apis mellifera*: the interaction between viscosity and sucrose concentration of the transferred solution // *Animal behaviour.*– 1999.– Vol. 57, N6.– P. 1319–1326.
82. *The dow chemical company* [Electronic resource] // [web-site] www.dow.com/ (11.01.2010).
83. *The engineering tool box* [Electronic resource] // [web-site] www.engineeringtoolbox.com (7.09.2010).
84. *Toegel R., Luther S., Lohse D.* Viscosity destabilizes sonoluminescing bubbles // *Phys. Rev. Lett.*– 2006.– Vol. 96, N11.– P. 1143011–1143014.
85. *Tracton A.A.* Coatings technology handbook.– Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.– 936 p.
86. *Uedaira H., Uedaira H.* Activity coefficients of aqueous xylose and maltose solutions // *Bull. Chem. Soc. Jpn.*– 1969.– Vol. 42, N11.– P. 2137–2140.
87. *Uribe S., Sampedro J.G.* Measuring solution viscosity and its effect on enzyme activity // *Biol. Proced. Online.*– 2003.– Vol. 5, N1.– P. 108–115.
88. *Venables D.S., Schmuttenmaer C.A.* Spectroscopy and dynamics of mixtures of water with acetone, acetonitrile, and methanol // *J. Chem. Phys.*– 2000.– Vol. 113, N24.– P. 11222–11236.
89. *Wensink E.J.W., Hoffmann A.C.* Dynamic properties of water/alcohol mixtures studied by computer simulation // *J. Chem. Phys.*– 2003.– Vol. 119, N14.– P. 7308–7317.
90. *Williams R.J., Harris D.* The distribution of cryoprotective agents into lipid interface // *Cryobiology.*– 1977.– Vol. 14, N6.– P. 670–680.
91. *Xie G., Timasheff S.N.* Mechanism of the stabilization of ribonuclease A by sorbitol: preferential hydration is greater for the denatured than for the native protein // *Protein science.*– 1997.– Vol. 6, N1.– P. 211–221.
92. *Yang C., Ma P., Tang D., Jin F.* Excess molar volume, viscosity and heat capacity for the mixture of 1,2-propanediol-water at different temperatures // *Chinese J. Chem. Eng.*– 2003.– Vol. 11, N2.– P. 175–180.

Accepted in 12.10.2010

Поступила 12.10.2010
Рецензент Т.П. Линник