

Термофизические свойства криопротекторов.**II. Динамическая вязкость ряда криопротекторов, их растворов и смесей**

UDC 532.133

A.F. TODRIN*, L.I. POPIVNIENKO, S.YE. KOVALENKO

Thermophysical Properties of Cryoprotectants.**II. Dynamic Viscosity of Some Cryoprotectants, Their Solutions and Mixtures**

Систематизированы данные разных литературных источников и выведены полиномиальные уравнения для расчета динамической вязкости воды, 21 чистого криопротектора и водных растворов трех криопротекторов различной концентрации в зависимости от температуры. Получены эмпирические зависимости для расчета динамической вязкости водных растворов NaCl и KCl, водных растворов 38 криопротекторов и 18 смесей некоторых криопротекторов от концентрации при разных температурах.

Ключевые слова: криопротектор, динамическая вязкость, эмпирические уравнения.

Систематизовано дані різних літературних джерел і виведено поліноміальні рівняння для розрахунку динамічної в'язкості води, 21 чистого криопротектора і водних розчинів трьох криопротекторів різної концентрації в залежності від температури. Отримано емпіричні залежності для розрахунку динамічної в'язкості водних розчинів NaCl і KCl, водних розчинів 38 криопротекторів і 18 сумішей деяких криопротекторів від концентрації при різних температурах.

Ключові слова: криопротектор, динамічна в'язкість, емпіричні рівняння.

The article represent summarized literature data and derivation of polynomial equations to calculate the dynamics viscosity of water, 21 pure cryoprotective agents and aqueous solutions of three cryoprotective agents in different concentrations depending on temperature. Empirical equations for various concentration and temperatures were obtained to calculate dynamic viscosity of aqueous solutions of NaCl and KCl, aqueous solutions of 38 cryoprotective agents and 18 mixtures of some cryoprotectants.

Key words: cryoprotective agent, dynamic viscosity, empirical equation.

Динамическая вязкость криопротекторов относится к тем физико-химическим свойствам, которые играют значительную роль в защите биообъектов при криоконсервировании. Например, чем выше вязкость среды, тем требуется меньшая скорость охлаждения для перевода ее в витрифицированное состояние, что снижает вероятность повреждения биообъектов при замораживании.

Однако в доступной литературе данные по динамической вязкости часто разрознены и имеют существенный разброс по величине. Кроме того, табличные значения динамической вязкости в зависимости от температуры или концентрации криопротектора имеют большие различия по этим величинам. Если учесть, что зависимости вязкости криопротекторов как от температуры, так и от концентрации имеют ярко выраженный нелинейный характер, то интерполяция внутри этих интервалов приведет к значительному отклонению величины вязкости для промежуточных значений температур или концентраций от истинного значения. В то же время применение эмпирических зависимостей динамической вязкости от температуры или кон-

Dynamic viscosity of cryoprotective agents (CPAs) is referred to those physical and chemical properties, playing an important role in the protection of biological objects during cryopreservation. For instance, the higher is the medium viscosity, the lower cooling rate is required for its transition into a vitrified state, thereby reducing the probability of damaging the biological objects during freezing.

However, in available literature the data on dynamic viscosity are frequently scattered and have significant dispersion. In addition, the table values of dynamic viscosity depending on temperature or concentration of CPA differ greatly on these values. If to take into account that the viscosity dependencies both on temperature and concentration are of vividly manifested non-linear character, then interpolation within these intervals leads to significant deviation of the viscosity value for intermediate temperature values or concentrations from the true value. At the same time the application of empiric dependencies of dynamic viscosity either on temperature or concentration of CPA in the experimental data will allow to determine quite accurately the value of viscosity for any concentrations or temperatures.

Институт проблем криобиологии и криомедицины
НАН Украины, г. Харьков

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

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

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

центрации криопротектора по экспериментальным данным позволит с достаточно высокой точностью определить значение вязкости для любых значений концентраций или температур.

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

Наряду с вязкостью криопротекторов были обработаны литературные данные по динамической вязкости воды и водных растворов NaCl и KCl, которые крайне важны как в жизнедеятельности человека, так и в криобиологии.

Значения динамической вязкости воды в зависимости от температуры взяты из различных источников [5, 7, 8, 14, 15, 18, 27, 38, 56, 62, 69]. Эта зависимость представлена на рисунке.

Кривая на рис. 1 может быть разбита на две части (зона положительных температур и зона переохлаждения), каждая из которых хорошо описывается полиномами пятой степени относительно температуры. Для воды при положительных температурах эмпирическое уравнение для расчета динамической вязкости имеет вид:

$$\mu = -4,319 \times 10^{-10} t^5 + 1,397 \times 10^{-7} t^4 - 1,837 \times 10^{-5} t^3 + 1,313 \times 10^{-3} t^2 - 5,928 \times 10^{-2} t + 1,789,$$

где t – температура, °C.

Это уравнение позволяет рассчитать вязкость воды в диапазоне температур от 0 до 100°C при дисперсии аппроксимации $\sigma^2 = 0,9999$. В результате расчета получаем значение динамической вязкости в сантипуазах (1 сП = 10^{-3} Па·с).

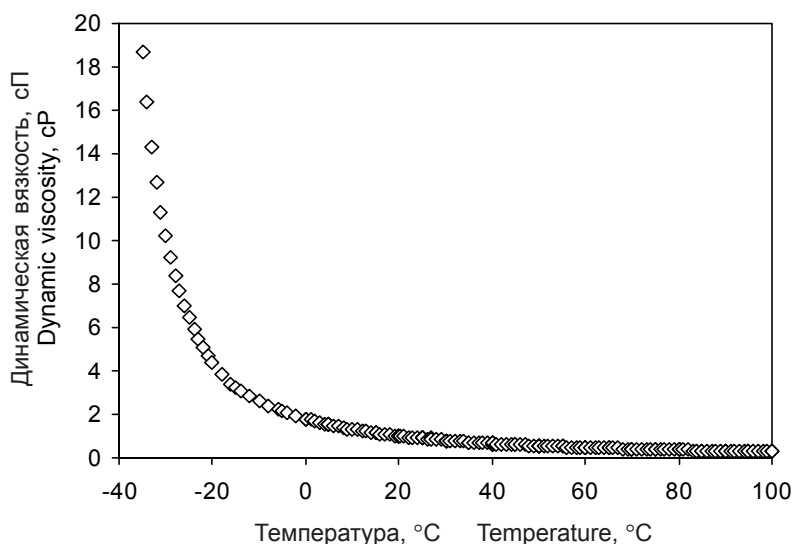
Для переохлажденной воды в интервале температур $-35...0^\circ\text{C}$ вязкость может быть рассчитана по формуле (при $\sigma^2 = 0,9998$):

$$\mu = -1,673 \times 10^{-6} t^5 - 1,093 \times 10^{-4} t^4 - 2,813 \times 10^{-3} t^3 - 2,699 \times 10^{-2} t^2 - 0,1548 t + 1,789.$$

Для чистых криопротекторов зависимость динамической вязкости от температуры описывается полиномом шестой степени:

$$\mu = a_6 t^6 + a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0. \quad (1)$$

Значения коэффициентов полинома $a_6 \div a_0$ (1) для ряда криопротекторов представлены в табл. 1. Для



Зависимость динамической вязкости воды от температуры.
Dependence of water dynamic viscosity on temperature.

The research aim was to summarize the literature data on the base of deriving empiric formulae to calculate the values of dynamic viscosity of pure CPAs, their aqueous solutions and mixtures depending on mass concentration and temperature.

Along with viscosity of CPAs there were processed literature data on dynamic viscosity of water and aqueous solutions of NaCl and KCl, which are extremely important both for human vital activity and cryobiology.

The values of dynamic viscosity of water depending on temperature are taken from different sources [5, 7, 8, 14, 15, 18, 27, 38, 56, 62, 69]. This dependence is presented in Fig. 1.

The curve in Fig. 1 can be divided into two parts (zone of positive temperatures and supercooling temperatures), each of them is well described with polynomials of the fifth degree in relation to the temperature. For water at positive temperatures the empiric equation to calculate dynamic viscosity is as follows:

$$\mu = -4,319 \times 10^{-10} t^5 + 1,397 \times 10^{-7} t^4 - 1,837 \times 10^{-5} t^3 + 1,313 \times 10^{-3} t^2 - 5,928 \times 10^{-2} t + 1,789,$$

where t is the temperature, °C

This equation enables to calculate the viscosity of water within the range of temperatures from 0 to 100°C at approximation dispersion $\sigma^2 = 0,9999$. As the result of calculations we obtain the value of dynamic viscosity in centipoise (1 cP = 10^{-3} Pa·s)

For supercooled water within the interval of temperatures $-35...0^\circ\text{C}$ the viscosity may be calculated with the formula (at $\sigma^2 = 0,9998$):

$$\mu = -1,673 \times 10^{-6} t^5 - 1,093 \times 10^{-4} t^4 - 2,813 \times 10^{-3} t^3 - 2,699 \times 10^{-2} t^2 - 0,1548 t + 1,780.$$

соблюдения размерностей принимается: $a_6 - \text{сП} \cdot ^\circ\text{C}^{-6}$, $a_5 - \text{сП} \cdot ^\circ\text{C}^{-5}$, $a_4 - \text{сП} \cdot ^\circ\text{C}^{-4}$, $a_3 - \text{сП} \cdot ^\circ\text{C}^{-3}$, $a_2 - \text{сП} \cdot ^\circ\text{C}^{-2}$, $a_1 - \text{сП} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, $a_0 - \text{сП}$.

Такую же зависимость имеет динамическая вязкость растворов криопротекторов от температуры.

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

$$\mu = b_6 C^6 + b_5 C^5 + b_4 C^4 + b_3 C^3 + b_2 C^2 + b_1 C + b_0, \quad (2)$$

где C – массовая концентрация криопротектора, %.

Такой же вид имеет зависимость для расчета динамической вязкости водных растворов NaCl и KCl, а также для смесей криопротекторов. Значения коэффициентов $b_6 \div b_0$ полинома (2) для водных растворов NaCl и KCl, водных растворов ряда криопротекторов и их смесей представлены в табл. 2–5. Для смесей криопротекторов в качестве массовой концентрации принимается концентрация второго криопротектора. Коэффициенты уравнений (1) и (2), не вошедшие в таблицы, равны нулю. Коэффициенты $b_6 \div b_0$ имеют размерности сП.

Поскольку подготовка криопротекторов к работе в основном осуществляется при комнатной температуре, мы вынесли в отдельную таблицу значения коэффициентов полиномов для расчета динамической вязкости ряда криопротекторов при температуре 20°C (табл. 3).

В табл. 6 приведены коэффициенты уравнения (1) для расчета динамической вязкости водных растворов некоторых криопротекторов в зависимости от температуры при разных концентрациях.

Литературные данные обрабатывали с помощью программы Excel.

В таблицах даны следующие условные обозначения: ДМСО – диметилсульфоксид; ДМФА – диметилформамид; ДМАц – диметилацетамид; ТЭГ – триэтиленгликоль; ДЭГ – диэтиленгликоль; ФА – формамид; МФА – метилформамид; МАц – метилацетамид; ЭГ – этиленгликоль; БД – бутандиол; ПД – пропандиол; ПЭО – полиэтиленоксид; ОЭГ – оксиэтилированный глицерин; ПВП – поливинилпирролидон; ОЭП – оксиэтилированный пентэритрит.

Выводы

Получены эмпирические уравнения для расчета динамической вязкости для воды, 21 чистого криопротектора и водных растворов трех криопротекторов различной концентрации в зависимости от температуры.

For pure CPAs the dependence of dynamic viscosity on temperature is described with the polynomial of the six degree:

$$\mu = a_6 t^6 + a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0. \quad (1)$$

The values of polynomial coefficients $a_6 \div a_0$ (1) for some CPAs are given in the Table 1. To keep dimensions it is assumed that: a_6 is $\text{сП} \cdot ^\circ\text{C}^{-6}$, $a_5 - \text{сП} \cdot ^\circ\text{C}^{-5}$, $a_4 - \text{сП} \cdot ^\circ\text{C}^{-4}$, $a_3 - \text{сП} \cdot ^\circ\text{C}^{-3}$, $a_2 - \text{сП} \cdot ^\circ\text{C}^{-2}$, $a_1 - \text{сП} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, $a_0 - \text{сП}$.

Dynamic viscosity of CPAs solutions have the same dependence on temperature.

To examine dynamic viscosity of aqueous solutions of CPAs depending on their mass concentration the polynomial equation was used:

$$\mu = b_6 C^6 + b_5 C^5 + b_4 C^4 + b_3 C^3 + b_2 C^2 + b_1 C + b_0, \quad (2)$$

where C is mass concentration of the CPA, %.

The same appearance has the equation for calculation of dynamic viscosity of aqueous solutions of NaCl and KCl, as well as the mixture of CPAs. The values of coefficients $b_6 \div b_0$ of polynomial (2) for aqueous solutions of NaCl and KCl, aqueous solutions of some CPAs and their mixtures are given in the Tables 2–5. For the mixtures of CPAs as mass concentration the concentration of the second CPA is assumed. The coefficients of equations (1) and (2) not presented in tables are equal to zero. Coefficients $b_6 \div b_0$ have the dimensions of сП.

Since the preparing of CPAs for application is mainly performed at room temperature we have summarized in a separate table the values of polynomial coefficients to calculate dynamic viscosity of some CPAs at 20°C (Table 3).

Table 6 demonstrates the coefficients of the equation (1) to calculate dynamic viscosity of aqueous solutions of some CPAs depending on temperature under various concentrations.

The literature data were processed using Excel software.

The following abbreviations are used in the Tables: DMSO – dimethyl sulfoxide; DMFA – dimethyl formamide; DMAc – dimethyl acetamide; TEG – triethylene glycol; DEG – diethylene glycol; MFA – methyl formamide; MAc – methyl acetamide; EG – ethylene glycol; BD – butane diol; PD – propane diol; PEO – polyethylene oxide; OEG – oxyethyl glycerol; PVP – polyvinylpyrrolidone; OEP – oxyethyl pentaerythrit.

Conclusions

There have been obtained empirical equations to calculate dynamic viscosity of water, 21 pure CPAs

На основании имеющихся литературных данных получены полиномиальные уравнения для расчета динамической вязкости водных растворов NaCl и KCl, водных растворов 38 криопротекторов и 18 смесей различных криопротекторов в зависимости от концентрации при различных температурах.

and aqueous solutions of three CPAs of different concentration depending on temperature.

Polynomial equations to calculate dynamic viscosity of aqueous solutions of NaCl and KCl, 38 CPAs and 18 mixtures of different CPAs depending on concentration under various temperatures were derived basing on available literature data.

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

Table 1. Coefficients of the equation (1) to calculate dynamic viscosity of some pure CPAs depending on temperature, dispersion of approximations and temperature ranges of equation application

Вещество Substance		$a_6, \times 10^{-10}$	$a_5, \times 10^{-8}$	$a_4, \times 10^{-6}$	$a_3, \times 10^{-4}$	$a_2, \times 10^{-3}$	$a_1, \times 10^{-2}$	a_0	σ^2	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник Reference
Амиды Amides	ДМАц DMAc	0	0	0	-0,00596	0,1804	-2,133	1,336	0,9966	0...125	[4,24,69]
	ДМФА DMFA	0	0	0	-0,009	0,1901	-1,816	1,155	0,9969	-10...80	[4,8,48,54,68,69]
	МАц MAc	0	0	0	0	1,032	-15,68	7,655	0,9751	30...60	[4,69]
	МФА MFA	0	0	0	0	0,07914	-3,103	2,425	0,9865	15...45	[4,49,69]
	ФА FA	0	0	0	-0,8078	8,426	-33,07	7,258	0,9569	5...50	[4,8,49,69]
Оксид Oxide	ДМСО DMSO	0	0	0	-0,1653	2,274	-12,54	3,953	0,9135	15...55	[4,16,23,30,45,53,69]
Спирты Alcohols	Глицерин Glycerol	0	0	635,8	-1381	11310	-42250	6336	0,9649	20...70	[6,8,15,17,20,65,69]
	Глицерин переохлаж- денный Overcooled glycerol	0	0	0	0	24227	-106700	12041	0,9989	0...15	[55]
	ДЭГ DEG	0	0	6,316	-16,69	160	-678,8	118,8	0,9992	0...100	[4,24,47,60]
	Метанол Methanol	0	0	0	-0,00006	0,05894	-1,157	0,8103	0,6904	0...100	[8,27,29,43,62,69]
	ТЭГ TEG	0	0	2,267	-7,113	85,23	-478,5	114,2	1	20...100	[4,60,69]
	ЭГ EG	0	0	0	-11,95	107,8	-360,5	57,287	0,9965	-10...40	[4,8,20,29,43]
	Этанол Ethanol	0	0	0,05324	-0,1155	0,9441	-4,711	1,824	0,9994	-50...100	[7,8,29,43,62,63,69]
	1,2-БД 1,2-BD	0	0	30,48	-56,45	398,1	-1351,0	209,2	0,9775	10...65	[69]
	1,3-БД 1,3-BD	0	0	0	-11,61	214,9	-1389	326,14	0,9983	25...65	[69]
	1,4-БД 1,4-BD	0	0	0	-4,476	97,34	-730,7	200,4	0,9937	20...90	[24,69]
	2,3-БД 2,3-BD	0	0	0	0	3,471	-158,03	89,161	0,6454	25...65	[69]
	1,2-ПД 1,2-PD	7,721	-40,17	83,67	-89,57	526,8	-1672	242,5	0,9984	0...150	[4,28,57,60,61,62,69]
	1,3-ПД 1,3-PD	0	0	0	-1,91	43,28	-343,13	101,38	0,9982	20...85	[69]

Таблица 2. Коэффициенты уравнения (2) для расчета динамической вязкости водных растворов NaCl и KCl в зависимости от концентрации и температуры, дисперсии аппроксимаций и диапазоны концентраций применения уравнения

Table 2. Coefficients of the equation (2) to calculate dynamic viscosity of aqueous solutions NaCl and KCl depending on concentration and temperature, dispersion of approximations and range of concentrations of the equation application

Раствор Solution	Температура, °C Temperature, °C	$b_3, \times 10^{-4}$	$b_2, \times 10^{-3}$	$b_1, \times 10^{-2}$	b_0	σ^2	Диапазон концентраций $C_{\text{масс. \%}}$ Concentration range $C, \%$ (m/m)	Источник Reference
KCl	25	0,05067	-0,1611	0,2418	0,893	0,9999	0+38	[39]
	30	0,04182	-0,1373	0,2933	0,797	0,9999		
	35	0,03153	-0,0976	0,2909	0,719	0,9999		
	40	0,02615	-0,08156	0,3109	0,652	0,9999		
	45	0,01843	-0,04776	0,2897	0,596	0,9999		
	50	0,01282	-0,02404	0,2765	0,547	0,9996		
NaCl	0	0,5293	0,768	0,84367	1,792	1,0	0+25	[15]
	15	0	1,43	0,314	1,14	0,9984	0+25	[43]
	20	0	0,33	1,627	1,002	0,9082	0+35	[15,19,40,51,60]
	25	0	0,36	1,172	0,89	0,9966	0+35	
	30	0	0,3	1,12	0,801	0,9982	0+35	
	35	0	0,27	1,024	0,719	0,9998	0+35	
	40	0	0,22	1,024	0,654	0,9975	0+35	
	45	0	0,21	0,916	0,596	0,9997	0+35	
	50	0	0,19	0,848	0,549	0,9998	0+35	
	55	0	0,16	0,831	0,504	0,9997	0+35	
	60	0	0,1415	0,8026	0,469	0,9984	0+35	
	65	0	0,14	0,735	0,4355	0,99977	0+35	
	70	0	0,12	0,703	0,4061	0,99976	0+35	

Таблица 3. Коэффициенты уравнения (2) для расчета динамической вязкости ряда водных растворов крипротекторов в зависимости от концентрации при 20°C, дисперсии аппроксимаций и диапазоны концентраций применения уравнения
Table 3. Coefficients of equation (2) to calculate dynamic viscosity of aqueous solutions of CPAs depending on concentration at 20°C, dispersion of approximations and range of concentrations of the equation application

Вещество Substance		$b_9, \times 10^{-9}$	$b_8, \times 10^{-7}$	$b_7, \times 10^{-5}$	$b_6, \times 10^{-4}$	$b_5, \times 10^{-3}$	$b_4, \times 10^{-2}$	b_0	σ^2	Диапазон концентраций C, масс. % Concentration range C, % (m/m)	Источник Reference
Амиды Amides	Ацетамид Acetamide	0	0	0	0	0,4893	0,2601	0,899	0,9903	0+50	[69]
	ДМАц DMAc	0	0	-0,04221	0,5219	-1,343	2,338	1,002	0,9916	0+95	[59,69]
Водорастворимые полимеры Water soluble polymers	ОЭГ n=1 OEG n=1	0	0	0	1,518	-5,9	11,29	1,002	0,9998	0+60	[1,2,21]
	ОЭГ n=2 OEG n=2	0	0	0	1,503	-5,844	15	1,002	0,9994	0+60	[1,2,21]
	ОЭГ n=4 OEG n=4	0	0	0	1,567	-5,364	15,29	1,002	0,9997	0+60	[1,2,21]
	ОЭГ n=5 OEG n=5	0	0	0	1,409	-4,033	11,82	1,002	0,9993	0+60	[1,2,21]
	ОЭГ n=6 OEG n=6	0	0	0	1,916	-6,568	17,59	1,002	0,9999	0+60	[1,2,21]
	ОЭГ n=7 OEG n=7	0	0	0	0,2987	0,1387	3,512	1,002	0,9998	0+60	[1,2,21]
	ОЭГ n=8 OEG n=8	0	0	0	1,234	-2,038	4,747	1,002	0,9999	0+60	[1,2,21]
	ОЭГ n=9 OEG n=9	0	0	0	0,6913	0,8163	0,4198	1,002	1	0+60	[1,2,21]
	ОЭГ n=10 OEG n=10	0	0	0	0,7579	0,1801	1,837	1,002	0,9999	0+60	[1,2,21]
	ОЭГ n=20 OEG n=20	0	0	0	0	4,25	1,798	1,002	0,9979	0+30	[1,2,21]
	ОЭГ n=30 OEG n=30	0	0	0	0	1,726	11,56	1,002	0,9581	0+30	[1,2,21]
	ПЭО-400 PEO-400	0	0	0	0	1,284	3,039	1,002	0,9948	0+30	[1,10,16,20]
	ПЭО-1000 PEO-1000	0	0	0	1,173	-2,01	6,725	1,002	0,9583	0+50	[1,10,16,20]
	ПЭО-1500 PEO-1500	0	0	0	0	4,839	17,03	1,002	0,9644	0+30	[9]
	ПЭО-2000 PEO-2000	0	0	0	0	3,865	3,865	1,002	0,998	0+30	[1,10,16,20]
ПЭО-4000 PEO-4000	0	0	0	0	9,017	8,322	1,002	0,9982	0+30	[1, 10, 16, 20]	
Спирты Alcohols	Глицерин Glycerol	3,963	-7,42	5,327	-17,41	26,09	-10,17	1,002	0,9981	0+75	[1,8,12,13,16,20,35,38,44,64,67,69]
	Глицерин Glycerol	0	9052	-38300	648000	-5480000	23160000	-3912000	0,9983	75+100	[1,8,12,13,16,20,35,38,44,64,67,69]
	ЭГ EG	0	0	0	0,1297	-0,06279	2,69	1,002	0,9986	0+60	[3,13,52]
	Этанол Ethanol	0	0	0,0129	-0,2447	0,6957	4,801	1,002	0,96	0+100	[8,40,44,58,69]
	1,4-БД 1,4-BD	0	0	0,2587	-2,642	9,823	-1,733	1,002	0,9993	0+100	[69]
Углеводы Carbohydrates	Сахароза Sucrose	0	2,735	-2,409	7,938	-9,267	6,959	1,002	0,9986	0+50	[38,64,66]
	Трегалоза Trehalose	0	0	0	0,7396	-1,999	6,08	1,002	0,9855	0+25	[64]

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

Table 4. Coefficients of equation (2) to calculate dynamic viscosity of aqueous solutions of CPAs depending on concentration at different temperatures; dispersion of approximations and range of concentrations of the equation application

Вещество Substance	Температура, °C Temperature, °C	$b_{6'} \times 10^{-9}$	$b_{5'} \times 10^{-7}$	$b_{4'} \times 10^{-5}$	$b_{3'} \times 10^{-4}$	$b_{2'} \times 10^{-3}$	$b_{1'} \times 10^{-2}$	b_0	σ^2	Диапазон концентраций С, масс. % Concentration range C, % (m/m)	Источник Reference	
Амиды Amides	ДМФА DMFA	25	0	0,04748	-0,1084	0,7585	-1,858	3,535	0,895	0,9732	0+100	[69]
	МАц MAc	35	0	0	-0,006603	0,02027	0,5695	1,48	0,721	0,999	0+100	[69]
	МАц MAc	40	0	0	0	-0,04916	0,6997	1,017	0,656	0,9991	0+75	[69]
	Мочевина Urea	25	0	0	-0,04206	0,4772	-1,558	2,995	0,893	0,9949	0+45	[36]
	МФА MFA	25	0	0	0,002814	-0,08397	0,5198	1,153	0,895	0,9935	0+100	[69]
	ФА FA	25	0	0	0,00849	-0,1165	0,5785	-0,3552	0,893	0,9991	0+100	[69]
		30	0	0	0,00685	-0,09823	0,5328	-0,3789	0,801	0,9993	0+100	
35		0	0	0	0	0,09713	0,1548	0,719	0,9972	0+75		
Водорастворимые полимеры Water soluble polymers	ОЭП OEP	37	0	0	0	0,1012	7,478	0,6947	0,9986	0+30	[1,2,20]	
	ПВП (м.в. 10000) PVP (m.m. 10,000)	25	0	0	5,982	-34,09	79,98	-42,59	0,893	0,9933	0+50	[28]
		35	0	0	3,578	-15,48	22,21	2,97	0,719	0,9957	0+50	
		45	0	25,33	-24,66	86,97	-119,3	57,88	0,596	0,9938	0+50	
		55	0	10,42	-8,27	23,38	-24,16	13,98	0,504	0,9955	0+50	

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	$b_6, \times 10^{-9}$	$b_7, \times 10^{-7}$	$b_4, \times 10^{-5}$	$b_3, \times 10^{-4}$	$b_2, \times 10^{-3}$	$b_1, \times 10^{-2}$	b_0	σ^2	Диапазон концентраций C, масс. % Concentration range C, % (m/m)	Источник Reference
Водорастворимые полимеры Water soluble polymers	ПЭГ-400 PEG-400	25	0	-0,8574	1,807	-11,32	29,53	-18,55	0,893	0,9992	0+100	[33,34]
		30	0	-0,6494	1,392	-9,035	24,51	-16	0,801	0,9998	0+100	
		35	0	-0,4017	0,8548	-5,337	14,33	-7,81	0,719	0,9997	0+100	
		40	0	-0,2766	0,5885	-3,608	9,717	-4,5	0,654	0,9996	0+100	
		45	0	-0,1587	0,3318	-1,876	4,922	-1,112	0,596	0,9996	0+100	
		50	0	-0,09319	0,1933	-1,018	2,658	0,1333	0,549	0,9996	0+100	
Оксиды Oxides	ДМСО DMSO	25	0,1268	-0,3078	0,2469	-0,8097	1,53	0,9269	0,893	0,9995	0+100	[25,30,41,69]
		45	0,05978	-0,1479	0,1216	-0,4094	0,7522	0,8102	0,596	0,9999	0+100	
		65	0,02785	-0,06961	0,05767	-0,1981	0,3968	0,5464	0,435	1,0	0+100	
Спирты Alcohols	Глицерин Glycerol	0	13,11	-23,18	0,159	-50,53	74,69	-32,25	1,794	0,9999	0+70	[1,8,12,13,16, 20,35,38,44,55, 64,67,69]
			258500	-1276000	2623000	-28710000	176500000	-578100000	787500000	1,0	70+100	
		10	0	1,682	-2,185	10,65	-19,99	0,1681	1,307	0,9999	0+70	
			68340	-335800	686900	-7486000	45830000	-149400000	202700000	1,0	70+100	
		25	0	0	0	2,209	-12,89	17,72	0,893	0,9998	0+80	
			0	0	2260	-79229	1043700	-6109700	1340600	0,9999	80+100	
		30	0	1,206	-1,845	10,07	-21,12	16,6	0,801	0,9989	0+80	
			0	5902	-25885	454480	-3992100	17539000	-3082500	0,9993	80+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	$b_{6'} \times 10^{-9}$	$b_{5'} \times 10^{-7}$	$b_{4'} \times 10^{-5}$	$b_{3'} \times 10^{-4}$	$b_{2'} \times 10^{-3}$	$b_{1'} \times 10^{-2}$	b_0	σ^2	Диапазон концентраций С, масс. % Concentration range C, % (m/m)	Источник Reference	
Глицерин Glycerol	40	0,90306	-1,5255	0,96448	-2,5969	3,2682	0,36694	0,654	0,9997	0+80		
		0	3492,8	-15434	272287	-2412100	10658000	-1883200	0,9999	80+100		
		0	0	0,00871	0,13543	-0,42654	1,742	0,548	0,9993	0+50		
	Метанол Methanol	30	0	0	0,00424	-0,07099	0,05656	2,012	0,801	0,9948	0+100	[52,69]
	ТЭГ TEG	30	0	0,04374	-0,07977	0,2724	0,7371	2,417	0,801	0,9987	0+100	[34,69]
	ТЭГ TEG	40	0	0,02945	-0,05626	0,2323	0,2111	2,313	0,653	0,9981	0+100	[34,69]
	ЭГ EG	-10	0	0	0	0	3,335	2,295	2,6	0,997	0+45	[3,13,37,43,52, 62]
		0	0	0	0	0	1,517	3,772	1,795	0,9983	0+45	
		10	0	0	0	0	0,8119	3,193	1,307	0,9939	0+45	
		25	0	0	0	0,2085	-1,264	5,669	0,893	0,9999	0+100	
50		0	0	0	0,1494	-0,6362	1,913	0,549	0,9936	0+45		
Этанол Ethanol	0	0	-0,1493	0,4041	-3,668	10,31	8,888	1,792	0,9973	0+100	[8,44,50,58,69]	
	10	0	0	0	0,02247	-1,416	12,38	1,308	0,9715	0+100		
	25	0	0	0	0,00603	-0,6734	6,117	0,893	0,9877	0+90		
	30	0	0	0	-0,04817	0,02559	3,666	0,83	0,9129	0+50		
	40	0	0	0	-0,01487	0,02373	1,183	0,654	0,9818	0+90		

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	$b_{6r} \times 10^{-9}$	$b_{5r} \times 10^{-7}$	$b_{4r} \times 10^{-5}$	$b_{3r} \times 10^{-4}$	$b_{2r} \times 10^{-3}$	$b_{1r} \times 10^{-2}$	b_0	σ^2	Диапазон концентраций С, масс. % Concentration range C, % (m/m)	Источник Reference	
Спирты Alcohols	1,2-БД 1,2-BD	25	0	0,4321	-0,7813	5,073	-11,63	14,85	0,893	0,9999	0+100	[69]	
		35	0	0	0	0	31,171	-469,81	188,18	0,9996	80+100		
	1,3-БД 1,3-BD	25	0	0	0,4304	-5,481	23,51	-21,5	0,893	0,9994	0+100	[69]	
		35	0	0	0	0	58,18	-868,96	339,63	0,9998	80+100		
	1,4-БД 1,4-BD	25	0	0,3669	0,6153	4,058	-10,79	22,07	0,893	1	0+100	[69]	
	2,3-БД 2,3-BD	25	0	0,8332	-1,086	4,549	-6,504	5,402	0,893	0,9959	0+45	[69]	
		35	0	0	0	0	24,9	-372,66	146,58	0,9998	80+100		
	1,3-ПД 1,3-PD	25	0	0	0,1181	-1,371	6,202	-4,221	0,893	0,9998	0+100	[69]	
		35	0	0	0	2,409	-44,18	290,47	-62,322	1	55+100		
	Углеводы Carbo- hydrates	Сахароза Sucrose	15	0	0	0,2665	-0,5512	1,689	0,4963	1,14	0,9955	0+40	[38,43]
			23	0	0	0,1393	-0,572	1,074	3,3	0,9358	0,9962	0+50	[26]
			30	0	0	0	0,6854	-1,212	2,954	0,801	0,9994	0+40	[32]

Таблица 5. Коэффициенты уравнения (2) для расчета динамической вязкости смесей криопротекторов в зависимости от концентрации второго криопротектора при различных температурах, дисперсии аппроксимаций и диапазоны концентраций применения уравнения

Table 5. Coefficients of equation (2) to calculate dynamic viscosity of CPAs mixtures depending on concentration of the second CPA at different temperatures, dispersion of approximations and range of concentrations of the equation application

Криопротектор 1/ Криопротектор 2 CPA1/ CPA2	Температура, °C Temperature, °C	$b_{6'} \times 10^{-9}$	$b_{5'} \times 10^{-7}$	$b_{4'} \times 10^{-5}$	$b_{3'} \times 10^{-4}$	$b_{2'} \times 10^{-3}$	$b_{1'} \times 10^{-2}$	b_0	σ^2	Диапазон концентраций С, масс. % Concentration range С, % (m/m)	Источник Reference
ΔМФА/ΔМАц DMFA /DMAC	25	0	0	0	0,000552	0,000267	0,07663	0,802	0,9999	0+100 ΔМАц DMAC	[69]
	35	0	0	0	-0,000033	0,00532	0,05086	0,713	0,9998	0+100 ΔМАц DMAC	
ΔМФА/ΔМСО DMFA/DMSO	25	0	0	0	0	0,08095	0,3615	0,802	0,999	0+100 ΔМСО DMSO	[69]
	35	0	0	0	0	0,05851	0,333	0,71	0,9992	0+100 ΔМСО DMSO	
ΔМФА/1,2-БД DMFA/1,2-BD	35	0,7512	-1,943	1,915	-8,535	16,88	-9,507	0,71	0,9995	0+100 БД BD	[69]
ΔМФА/1,3-БД DMFA/1,3-BD	35	1,444	-3,805	3,831	-17,48	35,11	-21,19	0,71	0,9985	0+100 БД BD	[69]
ΔМФА/1,4-БД DMFA/1,4-BD	35	0	0,1896	-0,3318	2,518	-7,14	8,132	0,71	0,9996	0+100 БД BD	[69]
ΔМФА/2,3-БД DMFA/2,3-BD	35	1,182	-2,885	2,665	-11,03	20,43	-12,98	0,71	0,9994	0+100 БД BD	[69]
Метанол/Глицерин Methanol/Glycerol	24	0	0	0	-1,143	16,33	38,87	0,9145	0,9988	0+80 Глицерин Glycerol	[31]
Метанол/ΔМФА Methanol/DMFA	25	0	0	0	0	0,00414	0,2303	0,5439	0,9997	0+100 ΔМФА DMFA	[69]
	30	0	0	0	0	0,00618	0,1934	0,51	0,9996	0+100 ΔМФА DMFA	
Метанол/ФА Methanol/FA	30	0	0	0,00452	-0,06538	0,4348	-0,06853	0,5	0,9984	0+100 ФА FA	[69]
	35	0	0	0,004083	-0,05485	0,3311	0,1158	0,46	0,9997	0+100 ФА FA	

Продолжение на следующей странице.
Next page to be continued.

Продолжение табл. 5
Table 5. (Continued from the previous page)

Криопротектор 1/ Криопротектор 2 CPA1/ CPA2	Температура, °C Temperature, °C	$b_6, \times 10^{-9}$	$b_5, \times 10^{-7}$	$b_4, \times 10^{-5}$	$b_3, \times 10^{-4}$	$b_2, \times 10^{-3}$	$b_1, \times 10^{-2}$	b_0	σ_2	Диапазон концентраций С, масс. % Concentration range С, % (m/m)	Источник Reference
МФА/ДМФА MFA/DMFA	25	0	0	0	-0,00169	0,07817	-1,524	1,721	0,9976	0+100 ДМФА DMFA	[69]
ТЭГ/ДМСО TEG/DMSO	35	0	0	0	0,008675	0,2679	-25,9	23,841	0,9994	0+100 ДМСО DMSO	[69]
ТЭГ/МАц TEG/MAc	35	0	0	0	0	1,1	-30,74	23,84	0,9997	0+100 МАц Ac	[69]
ТЭГ/ФА TEG/FA	35	0	0	0	-0,05991	2,736	-43,17	23,841	0,999	0+100 ФА FA	[69]
ФА/ДМАц FA/DMAc	25	0	0,04184	-0,0927	0,6166	-1,7	4,164	2,953	0,9996	0+100 ДМАц DMAc	[69]
ФА/ДМАц FA/DMAc	35	0	0	-0,004034	-0,01792	0,2029	1,291	2,384	0,9996	0+75 ДМАц DMAc	[69]
ФА/ЭГ FA/EG	25	0	0	0	0,1585	-0,9047	6,66	2,953	1,0	0+80 ЭГ EG	[22]
Этанол/ФА Ethanol/FA	30	0	0	0	0	-0,09669	2,827	0,95	0,9963	0+100 ФА FA	[69]
	35	0	0	0	-0,0013	-0,04454	2,212	0,87	0,9952	0+100 ФА FA	
1,2-ПД/ДМСО 1,2-PD/DMSO	35	0	0	0	0	-0,856	-15,3174	25,461	0,9998	0+100 ДМСО DMSO	[69]
1,2-ПД/ФА 1,2-PD/FA	35	0	0	0,02414	-0,8107	11,09	-77,34	25,461	0,993	0+100 ФА FA	[69]

Таблица 6. Коэффициенты уравнения (1) для расчета динамической вязкости водных растворов криопротекторов в зависимости от температуры при разных концентрациях; дисперсии аппроксимаций и диапазоны температур применения уравнения

Table 6. Coefficients of equation (1) to calculate dynamic viscosity of aqueous solutions of CPAs depending on temperature at different concentrations; dispersion of approximations and temperature ranges of the equation application

Вещество Substance	Концентрация C, масс. % Concentration, % (m/m)	$a_{3'} \times 10^{-8}$	$a_{4'} \times 10^{-6}$	$a_{5'} \times 10^{-4}$	$a_{2'} \times 10^{-3}$	$a_{1'} \times 10^{-2}$	a_0	σ^2	Диапазон температур, °C Temperature range, °C	Источник Reference
Сахароза Sucrose	60	0	0	-45	422,4	-1482,6	220,18	1,0	5...37	[42,46]
ЭГ EG	52,76	0	0	-23,33	-55	-141,7	7,0	1,0	-10...40	[36]
1,2-ПА 1,2-PD	58,5	0	0,3969	-1,238	14,73	-82,38	20,1	0,9999	20...100	[69]
	80,9	-1,035	4,282	-7,136	60,95	-276,2	57,12	1,0	20...110	
	92,7	-2,065	8,556	-14,28	121,9	-548,6	110,3	1,0	20...110	

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. *Карапетян Ю.А., Эйчис В.М.* Физико-химические свойства электролитных неводных растворов. – М.: Химия, 1989. – 256 с.
5. *Коверда В.П., Скрипов В.П.* Рост центров кристаллизации в аморфных слоях // Журнал физической химии. – 1984. – Т. 58, №10. – С. 2538–2540.
6. *Компанец А.М., Николенко А.В., Коцый 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.
7. *Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г.* Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1982. – 208 с.
8. *Краткий справочник физико-химических величин.* – Л.: Химия, 1983. – 232 с.
9. *Липина О.В., Морозова Т.Ф., Пустовойт П.А.* Влияние ПЭО-1500 на вязкостные и спектроскопические характеристики плазмы крови при температурах 0–40°C // Криобиология. – 1990. – № 3. – С. 53–55.
10. *Наконечный А.А., Михайличенко З.П.* Токсикологическая характеристика полиэтиленоксида с молекулярным весом 400 (ПЭО-400) // Криобиология и криомедицина. – 1975. – Вып. 1. – С. 120–121.
11. *Некоз И.А., Розанов Л.Ф., Пичугин Ю.И.* Влияние хлорида натрия на физико-химические свойства растворов ПЭО-1500 // Криобиология. – 1989. – №2. – С. 24–27.
12. *Новиков А.Н., Линник Т.П.* Влияние физико-химических свойств криопротекторов на скорость роста и размер кристаллов льда в модельных системах // Физико-химические свойства и биологическое действие криопротекторов: Сб. статей / Под ред. В.И. Лугового. – Харьков, 1990. – С. 99–103.
13. *Новиков А.Н., Пичугин Ю.И., Линник Т.П.* Влияние криопротекторов и ряда органических добавок на процесс ре-

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. – 198 p.
3. *Bogdanov N.S., Ivanov O.P., Kupriyanova A.V.* Refrigerating apparatuses. Properties of substances. Reference book. – Moscow: Agropromizdat, 1985. – 256 p.
4. *Karapetyan V.P., Eychis V.M.* Physical and chemical properties of electrolyte non-aqueous solutions. – Moscow: Khimiya, 1989. – 256 p.
5. *Koverda V.P., Skripov V.P.* Growth of crystallization centers in amorphous layers // Zhurnal Fizicheskoy Khimii. – 1984. – Vol. 58, N10. – P. 2538–2540.
6. *Kompaniets A.M., Nikolenko A.V., Koschiy S.V., Ivanova I.A.* Monomethyl ether of glycerol: cytotoxicity and cryoprotective efficiency during freezing of platelets // Physical and chemical properties and biological effect of cryoprotectants / Ed. by V.I. Lugovoy. – Kharkov, 1990. – P. 59–63.
7. *Koshkin N.I., Shirkevich M.G.* Reference book on elementary physics. – Moscow: Nauka, 1982. – 208 p.
8. *Brief Reference Book of Physical and Chemical Values.* – Leningrad: Khimiya, 1983. – 232 p.
9. *Lipina O.V., Morozova T.F., Pustovoyt P.A.* Effect of PEO-1500 on viscous and spectroscopic parameters of blood plasma under temperatures of 0–40°C // Kriobiologiya. – 1990. – N3. – P. 53–55.
10. *Nakonechnyy A.A., Mikhaylichenko Z.P.* Toxicological characterization of polyethylene oxide with molecular weight of 400 (PEO-400) // Kriobiologiya i Kriomeditsyna. – 1975. – Issue 1. – P. 120–121.
11. *Nekoz I.A., Rozanov L.F., Pichugin Yu.I.* Effect of sodium on physical and chemical properties of the solutions of PEO-1500 // Kriobiologiya. – 1989. – N2. – P. 24–27.
12. *Novikov A.N., Linnik T.P.* Effect of physical and chemical properties of cryoprotectants on growth rate and dimensions of ice crystals in model systems // Physical and chemical properties and biological effect of cryoprotectants / Ed. by V.I. Lugovoy. – Kharkov, 1990. – P. 99–103.
13. *Novikov A.N., Pichugin Yu.I., Linnik T.P.* Effect of cryoprotectants and some organic additives on ice recrystallization process in model systems // Problems of Cryobiology. – 1992. – N2. – P. 20–23.

- кристаллизации льда в модельных системах // Проблемы криобиологии.– 1992.– №2.– С. 20–23.
14. *Осипов Ю.А., Железный В.Б., Бондаренко Н.Ф.* Сдвиговая вязкость воды, переохлажденной до -35°C // Журнал физической химии.– 1977.– Т. 51, №5.– С. 1264–1265.
 15. *Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А.* Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии.– Л.: Химия, 1987.– 576 с.
 16. *Пушкарь Н.С., Шраго М.И., Белоус А.М.* Криопротекторы.– Киев: Наук. думка, 1978.– 204 с.
 17. *Таблицы физических величин. Справочник* / Под ред. И.К. Киикоина.– М.: Атомиздат, 1976.– 1008 с.
 18. *Теплотехнический справочник. Т.2* /Под ред. В.Н. Юреньева и П.Д. Лебедева.– М.: Энергия, 1976.– 896 с.
 19. *Тодрин А.Ф.* Влияние гематокрита на вязкость суспензии эритроцитов в капиллярном вискозиметре при малых размерах капилляров // Проблемы криобиологии.– 2005.– Т. 15, №1.– С. 14–19.
 20. *Шраго М.И., Гучок М.М., Калугин Ю.В.* Спрямоуваный синтез і комплексні вивчання криопротекторів// Вісник АН УРСР.– 1980.– №9.– С. 35–40.
 21. *Шраго М.И., Калугин Ю.В., Кочуровская Г.Г. и др.* Влияние оксиэтилирования на некоторые физико-химические и биологические характеристики глицерина// Криобиология и криомедицина.– 1976. Вып. 2.– С. 31–33.
 22. *Ali A., Nain A.K., Kumar N., Ibrahim M.* Density and viscosity of magnesium sulphate in formamide + ethylene glycol mixed solvent // Proc. Indian Acad. Sci (Chem Sci.).– 2002.– Vol. 114, N5.– P. 495–500.
 23. *Arkema Incorporation in North America [Электронный документ]* // [веб-сайт] www.arkema-inc.com/index.cfm (12.03.2010).
 24. *BASF Corporation – The chemical company [Электронный документ]* // [веб-сайт] www2.basf.us/corporate/index.html (3.03.2010).
 25. *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.
 26. *De Almeida Cunha B.C., Vitolo M.* Effect of viscosity on sucrose hydrolysis catalyzed by invertase obtained from *S. cerevisiae* // Biotechnol. Bioeng.– 1984.– Vol. 26, N7.– P. 811–813.
 27. *Elert G.* The physics hypertextbook [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://hypertextbook.com/physics> (20.03.2010).
 28. *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.
 29. *Freitas R.A.* Nanomedicine. Vol.1. Basic Capabilities, Landes Bioscience [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://www.nanomedicine.com/> (11.02.2010).
 30. *Gaylord Chemical Company LLC.* Dimethyl Sulfoxide (DMSO). Physical properties [Электронный документ] // [веб-сайт] www.gaylordchemical.com/bulletins (5.12.2009).
 31. *GP Instruments.* Sample viscosity effect and positive displacement autosamplers [Электронный документ] // [веб-сайт] www.alcottchromatography.com (9.09.2010).
 32. *Haddadin R.* Accuracy of Brookfield and capillary viscometers for newtonian viscosity determination [Электронный документ] // [веб-сайт] [www.seas.upenn.edu/courses/belab/Lab Projects/2002/be309f02m3p1.doc](http://www.seas.upenn.edu/courses/belab/Lab%20Projects/2002/be309f02m3p1.doc) (10.11.2009).
 33. *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.
 34. *Jerome F.S., Tseng J.T., Fan L.T.* Viscosities of aqueous glycol solutions // J. Chem. Eng. Data.– 1968.– Vol. 13, N4.– P. 496.
 35. *Jungermann E., Sonntag N.O.V.* Glycerine. A key cosmetic ingredient.– New York: Marcel Dekker, 1991.– 460 p.
 14. *Osipov Yu.A., Zheleznyy V.B., Bondarenko N.F.* Shift viscosity of water overcooled down to -35°C // Zhurnal Fizicheskoy Khimii.– 1977.– Vol. 51, N5.– P. 1264–1265.
 15. *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.
 16. *Pushkar N.S., Shrago M.I., Belous A.M.* Cryoprotectants.– Kiev: Naukova dumka, 1978.– 204 p.
 17. *Tables of physical values.* Reference book / Ed. by I.K. Kikoin.– Moscow: Atomizdat, 1976.– 1008 p.
 18. *Thermotechnical reference book.* / Ed. by V.N. Yurenev and P.D. Lebedev.– Moscow: Energiya, 1976.– Vol. 2.– 896 p.
 19. *Todrin A.F.* Hematocrit effect on viscosity of erythrocyte suspension in capillary viscosimeter at small sizes of capillaries // Problems of Cryobiology.– 2005.– Vol. 15, N1.– P. 14–19.
 20. *Shrago M.I., Guchok M.M., Kalugin Yu.V.* Directed synthesis and complex study of cryoprotectants// Visnyk AN UkrSSR.– 1980.– N9.– P. 35–40.
 21. *Shrago M.I., Kalugin Yu.V., Kochurovskaya G.G. et al.* Effect of oxyethylation on some physical-chemical and biological parameters of glycerol // Kriobiologiya i Kriomeditsyna.– 1976.– Issue 2.– P. 31–33.
 22. *Ali A., Nain A.K., Kumar N., Ibrahim M.* Density and viscosity of magnesium sulphate in formamide + ethylene glycol mixed solvent // Proc. Indian Acad. Sci (Chem Sci.).– 2002.– Vol. 114, N5.– P. 495–500.
 23. *Arkema Incorporation in North America [Electronic resource]* // [web-site] www.arkema-inc.com/index.cfm (12.03.2010).
 24. *BASF Corporation – The chemical company [Electronic resource]* // [web-site] www2.basf.us/corporate/index.html (3.03.2010).
 25. *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.
 26. *De Almeida Cunha B.C., Vitolo M.* Effect of viscosity on sucrose hydrolysis catalyzed by invertase obtained from *S. cerevisiae* // Biotechnol. Bioeng.– 1984.– Vol. 26, N7.– P. 811–813.
 27. *Elert G.* The physics hypertextbook [Electronic resource] // [web-site] <http://hypertextbook.com/physics> (20.03.2010).
 28. *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.
 29. *Freitas R.A.* Nanomedicine. Vol. 1. Basic Capabilities, Landes Bioscience, Georgetown, TX, 1999. [Electronic resource] // [web-site] <http://www.nanomedicine.com/> (11.02.2010).
 30. *Gaylord Chemical Company LLC.* Dimethyl Sulfoxide (DMSO). Physical properties [Electronic resource] // [web-site] www.gaylordchemical.com/bulletins (5.12.2009).
 31. *GP Instruments.* Sample viscosity effect and positive displacement autosamplers [Electronic resource] // [web-site] www.alcottchromatography.com (9.09.2010).
 32. *Haddadin R.* Accuracy of Brookfield and capillary viscometers for newtonian viscosity determination [Electronic resource] // [web-site] [www.seas.upenn.edu/courses/belab/Lab Projects/2002/be309f02m3p1.doc](http://www.seas.upenn.edu/courses/belab/Lab%20Projects/2002/be309f02m3p1.doc) (10.11.2009).
 33. *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.
 34. *Jerome F.S., Tseng J.T., Fan L.T.* Viscosities of aqueous glycol solutions // J. Chem. Eng. Data.– 1968.– Vol. 13, N4.– P. 496.
 35. *Jungermann E., Sonntag N.O.V.* Glycerine. A key cosmetic ingredient.– New York: Marcel Dekker, 1991.– 460 p.
 37. *Kawahara K., Tanford C.* Viscosity and density of aqueous solutions of urea and guanidine hydrochloride // J. Biol. Chem.– 1966.– Vol. 241, N13.– P. 3228–3232.

36. Karow A.M. Cryobiology 2001 for mammalian embryologist [Электронный документ] // [веб-сайт] www.xytex.com (10.10.2009).
37. Kawahara K., Tanford C. Viscosity and density of aqueous solutions of urea and guanidine hydrochloride // J. Biol. Chem.– 1966.– Vol. 241, N13.– P. 3228–3232.
38. Kaye&Laby Tables of physical and chemical constants [Электронный документ] // [веб-сайт] www.kayelab.npl.co.uk/toc/ (4.06.2009).
39. Kestin J., Khalifa H.E., Correia R.J. Tables of the dynamic and kinematic viscosity of aqueous KCl solutions in the temperature range 25–150°C and the pressure 0,1–35 MPa // J. Phys. Chem. Ref. Data.– 1981.– Vol. 10, N1.– P. 57–70.
40. 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.
41. LeBell R.G., Goring D.A.I. Density, viscosity, refractive index, and hygroscopicity of mixtures of water and dimethyl sulfoxide // J. Chem. Eng. Data.– 1962.– Vol. 7, N1.– P. 100–101.
42. Marinakis G.N., Barbenel J.C., Fisher A.C., Tsangaris S.G. A new capillary viscometer for whole blood viscosimetry // Biorheology.– 1999.– Vol. 36, N4.– P. 311–318.
43. Martinez I. Thermodynamics of solution [Электронный документ] // [веб-сайт] http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c07sol/solutions.htm (11.03.2010).
44. Martinez P., Rodriguez A.F. Study of the intrinsic properties of viscous flow in water-ethanol and water-glycerine mixtures// Z. Phys. Chemie.– 1987.– Vol. 268, N5.– P. 913–922.
45. Material safety data sheet. Dimethyl sulfoxide (DMSO) [Электронный документ] // [веб-сайт] www.herpes-coldsores.com/dmsol.pdf (12.12.2009).
46. Maxcy R.B., Sommer H.H. Fat separation in evaporated milc. I. Homogenization, separation, and viscosity tests // J. Dairy Sci.– 1954.– Vol. 37.– P. 60–71.
47. MEGlobal. Diethylene glycol. Product guide [Электронный документ] // [веб-сайт] www.meglobal.biz/literature/product_guides/MEGlobal_DEG.pdf (1.03.2010).
48. Novasol N.V. Chemical trading and distribution company [Электронный документ] // [веб-сайт] www.novasol.be/default.asp (7.09.2009).
49. Ohnaki H., Itoh S., Rode B.M. The structure of liquid N-methylformamid by means of X-ray diffraction and Ab Initio LCGO-MO-SCF calculations // Bull. Chem. Soc. Jpn.– 1986.– Vol. 59, N1.– P. 271–276.
50. Okamoto K., Hirota N., Terazima M. Diffusion of photochemically generated intermediate radicals in water-ethanol mixed solvents// J. Phys. Chem.– 1998.– Vol. 102, N19.– P. 3447–3454.
51. Omenyi S.N., Snyder R.S. Settling of fixed erythrocyte suspension droplets // Biorheology.– 1983.– Vol. 20, N2.– P. 109–118.
52. Pajot-Augy E., Prost R., Axelos M.A.V. Cryosolvents effects on low temperature gel structure of denatured collagen// Cryobiology.– 1991.– Vol. 28, N4.– P. 335–346.
53. Rao B.G., Singh U.C. A free energy perturbation study of salvation in methanol and dimethyl sulfoxide // J. Am. Chem. Soc.– 1990.– Vol. 112, N12.– P. 3803–3811.
54. 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 // Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology.– 2007.– Vol. 1, N3.– P. 1–10.
55. Safechem [Электронный документ] // [веб-сайт] www.dow.com/glycerine/resources/physicalprop.htm (1.02.2010).
56. 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.
57. Shell Chemical [Электронный документ] // [веб-сайт] www.shell.com (3.09.2009).
58. Simmonds C. Alcohol, its production, properties, chemistry, and industrial applications [Electronic resource] // [web-site] http://chestofbooks.com/food/beverages/Alcohol-Propeties/index.html (12.02.2010).
59. Singh N.P., Singh M.M., Tikoo P.K. The coefficients of Jones-Dole equation for the viscosity of solutions of potassium iodide in mixture of water and dimethylacetamide at 35°C // Aust. J. Chem.– 1977.– Vol. 30, N10.– P. 2303–2305.
38. Kaye&Laby Tables of physical and chemical constants. [Electronic resource] // [web-site] www.kayelab.npl.co.uk/toc/ (4.06.2009).
39. Kestin J., Khalifa H.E., Correia R.J. Tables of the dynamic and kinematic viscosity of aqueous KCl solutions in the temperature range 25–150°C and the pressure 0,1–35 MPa // J. Phys. Chem. Ref. Data.– 1981.– Vol. 10, N1.– P. 57–70.
40. 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.
41. LeBell R.G., Goring D.A.I. Density, viscosity, refractive index, and hygroscopicity of mixtures of water and dimethyl sulfoxide // J. Chem. Eng. Data.– 1962.– Vol. 7, N1.– P. 100–101.
42. Marinakis G.N., Barbenel J.C., Fisher A.C., Tsangaris S.G. A new capillary viscometer for whole blood viscosimetry // Biorheology.– 1999.– Vol. 36, N4.– P. 311–318.
43. Martinez I. Thermodynamics of solution [Electronic resource] // [web-site] http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c07sol/solutions.htm (11.03.2010).
44. Martinez P., Rodriguez A.F. Study of the intrinsic properties of viscous flow in water-ethanol and water-glycerine mixtures// Z. Phys. Chemie.– 1987.– Vol. 268, N5.– P. 913–922.
45. Material safety data sheet. Dimethyl sulfoxide (DMSO) [Electronic resource] // [web-site] www.herpes-coldsores.com/dmsol.pdf (12.12.2009).
46. Maxcy R.B., Sommer H.H. Fat separation in evaporated milc. I. Homogenization, separation, and viscosity tests // J. Dairy Sci.– 1954.– Vol. 37.– P. 60–71.
47. MEGlobal. Diethylene glycol. Product guide [Electronic resource] // [web-site] www.meglobal.biz/literature/product_guides/MEGlobal_DEG.pdf (1.03.2010).
48. Novasol N.V. Chemical trading and distribution company [Electronic resource] // [web-site] www.novasol.be/default.asp (7.09.2009).
49. Ohnaki H., Itoh S., Rode B.M. The structure of liquid N-methylformamid by means of X-ray diffraction and Ab Initio LCGO-MO-SCF calculations // Bull. Chem. Soc. Jpn.– 1986.– Vol. 59, N1.– P. 271–276.
50. Okamoto K., Hirota N., Terazima M. Diffusion of photochemically generated intermediate radicals in water-ethanol mixed solvents// J. Phys. Chem.– 1998.– Vol. 102, N19.– P. 3447–3454.
51. Omenyi S.N., Snyder R.S. Settling of fixed erythrocyte suspension droplets // Biorheology.– 1983.– Vol. 20, N2.– P. 109–118.
52. Pajot-Augy E., Prost R., Axelos M.A.V. Cryosolvents effects on low temperature gel structure of denatured collagen// Cryobiology.– 1991.– Vol. 28, N4.– P. 335–346.
53. Rao B.G., Singh U.C. A free energy perturbation study of salvation in methanol and dimethyl sulfoxide // J. Am. Chem. Soc.– 1990.– Vol. 112, N12.– P. 3803–3811.
54. 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 // Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology.– 2007.– Vol.1, N3.– P. 1–10.
55. Safechem [Electronic resource] // [web-site] www.dow.com/glycerine/resources/physicalprop.htm (1.02.2010).
56. Sengers J.V., Kamgar-Parsi B. Representative equations for the viscosity of water substance.// J. Phys. and Chem. Ref. Data.– 1984.– Vol.13, N1.– P. 185–205.
57. Shell Chemical [Electronic resource] // [web-site] www.shell.com (3.09.2009).
58. Simmonds C. Alcohol, its production, properties, chemistry, and industrial applications [Electronic resource] // [web-site] http://chestofbooks.com/food/beverages/Alcohol-Propeties/index.html (12.02.2010).
59. Singh N.P., Singh M.M., Tikoo P.K. The coefficients of Jones-Dole equation for the viscosity of solutions of potassium iodide in mixture of water and dimethylacetamide at 35°C // Aust. J. Chem.– 1977.– Vol. 30, N10.– P. 2303–2305.

58. *Simmonds C.* Alcohol, its production, properties, chemistry, and industrial applications [Электронный документ] // [веб-сайт] <http://chestofbooks.com/food/beverages/Alcohol-Properties/index.html> (12.02.2010).
59. *Singh N.P., Singh M.M., Tikoo P.K.* The coefficients of Jones-Dole equation for the viscosity of solutions of potassium iodide in mixture of water and dimethylacetamide at 35°C // *Aust. J. Chem.*— 1977.— Vol. 30, N10.— P. 2303–2305.
60. *Specific gravity and viscosity of liquids* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.scgnetwork.com (31.10.2009)
61. *Technology lubricant corporation. A comparison of ethylene glycol and propylene glycol* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.technologylubricants.com (9.12.2009).
62. *The engineering tool box* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.engineeringtoolbox.com (11.01.2010).
63. *Tracton A.A.* Coatings technology handbook.— Boca Raton: Taylor&Francis, 2005.— 936 p.
64. *Uribe S., Sampedro J.G.* Measuring solution viscosity and its effect on enzyme activity // *Biological Procedures Online.*— 2003.— Vol.5, N1.— P. 108–115.
65. *Van Gelder M.F.* A thermistor based method for measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of moist food materials at high temperatures: Thesis ... Doctor of Philosophy in Biological Systems Engineering.— Blackburg, 1998.— 160 p.
66. *Vashirakovit C., Leung D.-J., Foy G., Katrencik J.* Accuracy of Brookfield and capillary viscometers for the determination of Newtonian viscosity [Электронный документ] // [веб-сайт] www.seal.upenn.edu/courses/belab/LabProjects/2002/be309f02t3p1.doc (3.01.2010).
67. *Viscosity of aqueous glycerine solutions in centipoises* [Электронный документ] // [веб-сайт] www.dov.com/glycerine/resources/table18.htm (29.08.2009).
68. *Wang J., Tian Y., Zhao Y., Zhuo K.* A volumetric and viscosity study for the mixtures of 1-n-butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate ionic liquid with acetonitrile, dichloromethane, 2-butanone and N,N-dimethylformamide // *Green Chemistry.*— 2003.— Vol. 5, N5.— P. 618–622.
69. *Wohlfarth Ch., Wohlfarth B.* Viscosity of pure organic liquids and binary liquid mixtures. Subvolume B: Pure Organic Liquids / Ed. M.D. Lechner.— Berlin: Springer, 2002.— 389 p.
70. *Specific gravity and viscosity of liquids* [Electronic resource] // [web-site] www.scgnetwork.com (31.10.2009).
71. *Technology lubricant corporation. A comparison of ethylene glycol and propylene glycol* [Electronic resource] // [web-site] www.technologylubricants.com (9.12.2009).
72. *The engineering tool box* [Electronic resource] // [web-site] www.engineeringtoolbox.com (11.01.2010).
73. *Tracton A.A.* Coatings technology handbook – Boca Raton: Taylor&Francis, 2005.— 936 p.
74. *Uribe S., Sampedro J.G.* Measuring solution viscosity and its effect on enzyme activity//*Biological Procedures Online.*— 2003.— Vol. 5, N1.— P. 108–115.
75. *Van Gelder M.F.* A thermistor based method for measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of moist food materials at high temperatures: Thesis ... Doctor of Philosophy in Biological Systems Engineering.— Blackburg, 1998.— 160 p.
76. *Vashirakovit C., Leung D.-J., Foy G., Katrencik J.* Accuracy of Brookfield and capillary viscometers for the determination of Newtonian viscosity [Electronic resource] // [web-site] www.seal.upenn.edu/courses/belab/LabProjects/2002/be309f02t3p1.doc (3.01.2010).
77. *Viscosity of aqueous glycerine solutions in centipoises* [Electronic resource] // [web-site] www.dov.com/glycerine/resources/table18.htm (29.08.2009).
78. *Wang J., Tian Y., Zhao Y., Zhuo K.* A volumetric and viscosity study for the mixtures of 1-n-butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate ionic liquid with acetonitrile, dichloromethane, 2-butanone and N,N-dimethylformamide // *Green Chemistry.*— 2003.— Vol. 5, N5.— P. 618–622.
79. *Wohlfarth Ch., Wohlfarth B.* Viscosity of pure organic liquids and binary liquid mixtures. Subvolume B: Pure Organic Liquids / Ed. M.D. Lechner.— Berlin: Springer, 2002.— 389 p.

Accepted in 06.04.2010

*Поступила 06.04.2010
Рецензент Т.П. Линник*