

А. В. Малыгин, А. В. Клинов, А. Р. Хайруллина,
А. Р. Сафина

ВЛИЯНИЕ ЭКСТРАКТИВНЫХ АГЕНТОВ НА ПЛОТНОСТЬ И ВЯЗКОСТЬ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ПРИ РЕКТИФИКАЦИИ СМЕСИ ИЗОПРОПАНОЛ-ВОДА

Ключевые слова: динамическая вязкость, плотность, экстрактивные агенты.

В работе исследовались динамическая вязкость и плотность трехкомпонентных смесей, состоящих из бинарной азеотропной смеси изопропанол-вода и экстрактивного агента. Для исследований были выбраны три точки профиля концентраций в жидкой фазе в экстрактивной колонне разделения смеси изопропанол - вода в перерасчете на псевдобинарную смесь: первая точка - 95/5 % мас.; вторая точка - 5/95 % мас.; третья точка азеотропа - 88/12 % мас. Для выбранных точек были приготовлены модельные смеси, к которым добавлялось 13% мас. экстрактивного агента. В качестве экстрагентов в работе использовались моноэтиленгликоль (ЭГ), который используется в промышленных процессах, 1-этил-3-метил имидазолий хлорид ([Emim][Cl]) и аминокэфир борной кислоты на основе триэтиленгликоля (АЭБК). Для данных смесей были получены экспериментальные данные по концентрационной и температурной зависимостям динамической вязкости и плотности. Результаты показали, что вязкость системы увеличивается в ряду ЭГ, АЭБК, [Emim][Cl]. Для проведения расчетов исследуемых теплофизических свойств в работе использовались известные выражения: для плотности - через сумму объемов; для вязкости - модель Кендалла-Манро. Для трехкомпонентной смеси с ЭГ представлены результаты расчета свойств, выполненные в пакете AspenPlus V12. Проведенные в работе исследования показали, что моделирование плотности исследуемых смесей является достаточно точным, расхождение экспериментальных и расчетных данных не превышает 1%. Моделирование коэффициента динамической вязкости системы по модели Кендалла-Манро для смеси изопропанол-вода в присутствии исследуемых экстрактивных агентов может приводить к существенным ошибкам, максимальное значение достигает 52%. Расчетные значения коэффициента динамической вязкости получаются заниженными, что в свою очередь может привести к ошибкам при моделировании на основе этих свойств процессов тепло- и массообмена, протекающих в аппарате.

A. V. Malygin, A. V. Klinov, A. R. Khairullina,
A. R. Safina

INFLUENCE OF EXTRACTIVE AGENTS ON DENSITY AND VISCOSITY OF LIQUID PHASE DURING RECTIFICATION OF ISOPROPANOL-WATER MIXTURE

Keywords: dynamic viscosity, density, extractive agents.

In this work, the dynamic viscosity and density of three-component mixtures consisting of a binary azeotropic mixture of isopropanol-water and an extractive agent were investigated. Three points of the profile of concentrations in the liquid phase in the extractive separation column of isopropanol-water mixture in recalculation on the pseudobinary mixture were selected for research: the first point - 95/5 % wt. %; the second point - 5/95 % wt. %; the third azeotrope point - 88/12 % wt. %. For the selected points model mixtures were prepared to which 13 % wt. % of the extractive agent was added. The extractants used in this work were monoethylene glycol (EG), which is used in industrial processes, 1-ethyl-3-methyl imidazolium chloride ([Emim][Cl]) and triethylene glycol-based boronic acid amino ester (AEBA). Experimental data on concentration and temperature dependences of dynamic viscosity and density were obtained for these mixtures. The results showed that the viscosity of the system increases in the series of EG, AEBA, [Emim][Cl]. To carry out calculations of the investigated thermophysical properties in the work we used known expressions: for density - through the sum of volumes; for viscosity - the Kendall-Manroe model. For a three-component mixture with EG, the results of calculations of properties performed in the AspenPlus V12 package are presented. The studies carried out in this work have shown that the density modeling of the studied mixtures is quite accurate, the discrepancy between experimental and calculated data does not exceed 1%. Modeling of the dynamic viscosity coefficient of the system by the Kendall-Manroe model for isopropanol-water mixture in the presence of the studied extractive agents can lead to significant errors, the maximum value reaches 52%. The calculated values of the dynamic viscosity coefficient are underestimated, which in turn can lead to errors in modeling (on the basis of these properties) of heat and mass transfer processes occurring in the apparatus.

Введение

Теплофизические свойства чистых жидкостей и жидких смесей являются одними из основных, требуемых в химической технологии на стадии проектирования установок и оптимизации технологических процессов с помощью моделирования. К одним из основных теплофизических свойств жидкостей при проектировании процессов химической технологии

относятся теплопроводность для передачи тепла, вязкость для передачи импульса и коэффициент диффузии для передачи массы. Причем что данные свойства взаимосвязаны, и на основе изменения одного свойства наблюдается корреляция в поведении других, например, с уменьшением коэффициента вязкости увеличиваются коэффициенты теплопроводности и диффузии в системе. Однако, вязкость, по сравнению с коэффициентами теплопроводности и диффузии, поддается проще аппаратному измерению.

В этой связи, вязкость является одним из важных свойств системы, необходимым для моделирования процессов химической технологии. Вязкость используется при расчетах безразмерных критериев подобия, таких как числа Рейнольдса, Прандтля и Шервуда, которые в свою очередь используются для определения коэффициентов тепло- и массопередачи при выполнении расчетов. С другой стороны, число Рейнольдса также используется при расчете гидравлических сопротивлений аппаратов.

Вязкости жидкостей, как чистых компонентов, так и их смесей, доступны в коммерческих симуляторах; однако они могут показывать большие отклонения для смесей из-за молекулярных взаимодействий и отсутствия параметров бинарного взаимодействия.

В данной работе исследуются теплофизические свойства (динамическая вязкость, плотность) трехкомпонентных смесей, состоящих из бинарной азеотропной смеси изопропанол-вода и экстрактивного агента. Цель работы проанализировать возможное влияние изменения экстрактивного агента в процессе на разделительные характеристики аппарата. Как было показано в работе [1], замена экстрактивного агента может привести к ухудшению качества разделения в колонне экстрактивной ректификации за счет увеличения вязкости системы.

Материалы и оборудование

Модельные смеси для проведения экспериментальных исследований готовятся из дистиллированной воды по ГОСТ Р 58144-2018, изопропанола ОСЧ(Россия), этиленгликоля высшего сорта по ГОСТ 19710-2019 (ПАО "Нижекамскнефтехим", Россия) 99,76 % мас., ионной жидкости [Emim][Cl] («SigmaAldrich» (99.7%)), аминоэфира борной кислоты на основе триэтиленгликоля АЭБК (каф. ТСК, КНИТУ).

Приготовление исходных смесей проводилось на весах ShincoADJ с погрешностью измерения $\pm 0,0001$ г.

Содержание воды в исходных смесях определялось на волуметрическом титраторе фирмы

MettlerToledo «V20 Compact Karl Fischer Volumetric» по методу Карла Фишера (с относительной погрешностью измерения $\pm 3\%$).

Динамическая вязкость и плотность образцов определялась при атмосферном давлении на вискозиметре AntonPaarStabinger SVM 3000 (Graz, Austria): относительная погрешность измерения вязкости $\pm 0,5\%$; абсолютная погрешность измерения плотности $\pm 0,0005$ г/см³; абсолютная погрешность измерения температуры $\pm 0,02^\circ\text{C}$.

Экспериментальная часть

С целью исследования влияния экстрактивных агентов на теплофизические свойства рабочей среды при разделении смеси изопропанол-вода были измерены плотность и вязкость трехкомпонентных смесей при разном соотношении компонентов. В работе [2] рассматривалось влияние разных экстрактивных агентов на коррозионную агрессивность рабочей среды в колонне экстрактивной ректификации, с учетом изменения концентрации спирта по высоте колонны. В данной работе также были выбраны точки профиля экстрактивной колонны изопропанол - вода в перерасчете на псевдобинарную смесь: 95/5 % мас.; вторая точка - 5/95 % мас.; точка азеотропа - 88/12 % мас. Для выбранных точек были приготовлены модельные смеси, к которым добавлялось 13% мас. экстрактивного агента.

В качестве экстрагентов в работе использовались моноэтиленгликоль (ЭГ), который используется в промышленных процессах, 1-этил-3-метил имидазоль хлорид ([Emim][Cl]) и аминоэфирборной кислоты на основе триэтиленгликоля (АЭБК) [3].

Полученные экспериментальные данные по концентрации и температурной зависимостям динамической вязкости и плотности смесей приведены в таблицах 1-2. Массовые концентрации смеси изопропанол-вода даны в шапке таблицы в перерасчете на псевдобинарную смесь.

Таблица 1 – Динамическая вязкость трехкомпонентной смеси изопропанол (IPA)-вода (H₂O)-экстрагент
Table 1 – Dynamic viscosity of the three-component mixture isopropanol (IPA)-water (H₂O)-extractant

T, °C	Дин.вязкость, мПа*с							
	95% мас. IPA, 5% H ₂ O			88% мас. IPA, 12% H ₂ O			5% мас. IPA, 95% H ₂ O	
	EmimCl	ЭГ	АЭБК	EmimCl	ЭГ	АЭБК	EmimCl	ЭГ
5	6.200	5.571	5.829	6.650	6.218	6.832	2.669	3.043
10	5.219	4.6818	4.871	5.545	5.148	5.633	2.267	2.556
15	4.418	3.9293	4.075	4.638	4.296	4.668	1.935	2.151
20	3.752	3.3233	3.447	3.911	3.601	3.895	1.673	1.841
25	3.211	2.8327	2.924	3.327	3.044	3.280	1.462	1.593
30	2.767	2.4326	2.504	2.853	2.596	2.787	1.292	1.395
35	2.402	2.1002	2.157	2.463	2.230	2.386	1.152	1.232
40	2.096	1.8235	1.870	2.141	1.930	2.058	1.035	1.098
45	1.838	1.5924	1.631	1.873	1.678	1.788	0.936	0.985
50	1.620	1.3948	1.429	1.650	1.466	1.563	0.852	0.890
55	1.432	1.2157	1.256	1.461	1.285	1.375	0.781	0.810
60	1.266	1.0748	1.106	1.302	1.125	1.217	0.717	0.740
65	1.119	0.9513	0.976	1.164	0.993	1.083	0.663	
70	1.002		0.873	1.015		0.964	0.617	

Таблица 2 – Плотность трехкомпонентной смеси изопропанол (IPA)-вода (H₂O)-экстрагентTable 2 – Density of the three-component mixture isopropanol (IPA)-water (H₂O)-extractant

Плотность, г/см ³								
T, °C	95% мас. IPA, 5% H ₂ O			88% мас. IPA, 12% H ₂ O			5% мас. IPA, 95% H ₂ O	
	EmimCl	ЭГ	АЭБК	EmimCl	ЭГ	АЭБК	EmimCl	ЭГ
5	0.850	0.844	0.849	0.864	0.860	0.866	1.014	1.013
10	0.846	0.840	0.844	0.86	0.8562	0.8618	1.012	1.0017
15	0.842	0.836	0.8405	0.856	0.8522	0.8576	1.011	1.0104
20	0.838	0.832	0.8363	0.852	0.848	0.8534	1.009	1.009
25	0.834	0.827	0.8321	0.848	0.8438	0.8491	1.008	1.0072
30	0.830	0.823	0.8278	0.844	0.8396	0.8448	1.006	1.0054
35	0.826	0.819	0.8234	0.84	0.8352	0.8404	1.004	1.0033
40	0.822	0.815	0.819	0.835	0.8308	0.836	1.001	1.001
45	0.818	0.810	0.8145	0.831	0.8264	0.8314	0.999	0.9989
50	0.813	0.806	0.8099	0.827	0.8217	0.8268	0.997	0.9964
55	0.809	0.801	0.8052	0.822	0.817	0.8222	0.994	0.9937
60	0.805	0.796	0.8004	0.818	0.8124	0.8174	0.991	0.9911
65	0.800	0.791	0.7956	0.813	0.807	0.8126	0.987	
70	0.795		0.7906	0.809		0.8076	0.981	

Как видно из представленных результатов, температурная зависимость свойств смеси изопропанол-вода при добавлении разных экстрактивных агентов остается неизменной, с повышением температуры плотность и вязкость трехкомпонентной системы уменьшаются. Сравнительный анализ проводится на основе смеси с ЭГ, так как он используется в промышленности в качестве экстрактивного агента. Наименьшее влияние замены в качестве третьего компонента ЭГ наблюдается для плотности, среднее отклонение не превышает 0,88 %. Для вязкости наиболее сильное отличие наблюдается для смеси с [Emim][Cl] - среднее отклонение, в зависимости от концентрации водноспиртовой смеси, находится в диапазоне от 7 до 14,5% в сторону увеличения вязкости. Для смеси с АЭБК это значение меньше от 3 до 7,8%, но тоже в большую сторону.

Расчетная часть

При моделировании химико-технологических процессов зачастую приходится иметь дело не с индивидуальными веществами, а их смесями. Для оценки условий фазовых равновесий, термодинамических и теплофизических свойств используются различные модели расчета. В данной работе для расчета исследуемых теплофизических свойств используются следующие выражения [4]:

- при расчете плотности смеси жидкостей:

$$\frac{1}{\rho_{см}} = \frac{\bar{x}_1}{\rho_1} + \frac{\bar{x}_2}{\rho_2} + \dots, \quad (1)$$

где $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots$ – массовые доли компонентов смеси; $\rho_{см}, \rho_1, \rho_2, \dots$ – плотности смеси и ее компонентов;

- при расчете динамического коэффициента вязкости смеси жидкостей модель Кендалла–Манро:

$$\ln \mu_{см} = x_1 \ln \mu_1 + x_2 \ln \mu_2 + \dots, \quad (2)$$

где $\mu_1, \mu_2, \dots$ – динамические коэффициенты вязкости отдельных компонентов; $x_1, x_2, \dots$ – мольные доли компонентов в смеси. Модель Кендалла–Манро рекомендуется использовать в отсутствие экспериментальных данных для смеси и для химически подобных веществ погрешность должна быть менее 15% [4].

В табл. 3 приведены литературные данные по исследуемому в работе теплофизическим свойствам для чистых жидкостей при значениях температуры 20, 40 и 60°C, что соответствует области, где все компоненты смеси находятся в жидком состоянии при атмосферном давлении.

В таблице 4 представлены следующие результаты: расчет коэффициента динамической вязкости трехкомпонентных смесей по выражению (2); расхождение полученных расчетных и экспериментальных данных (см.табл. 1.); расчет коэффициента динамической вязкости трехкомпонентных смесей с ЭГ в пакете AspenPlusV12; в последнем столбце расхождение полученных расчетных в пакете AspenPlusV12 с результатами расчета трехкомпонентных смесей ЭГ по выражению (2).

В таблице 5 представлены следующие результаты: расчет плотности трехкомпонентных смесей по выражению (1); расхождение полученных расчетных и экспериментальных данных (см.табл. 2.); расчет плотности трехкомпонентных смесей с ЭГ в пакете AspenPlusV12; в последнем столбце расхождение полученных расчетных в пакете AspenPlusV12 с результатами расчета трехкомпонентных смесей с ЭГ по выражению (1).

Таблица 3 – Теплофизические свойства чистых компонентов

Table 3 – Thermophysical properties of pure components

T, °C	Плотность, г/см ³			Коэффициент динамической вязкости, мПа·с		
	20	40	60	20	40	60
IPA [5,6]	0.785	0.768	0.752	2.39	1.33	0.806
H ₂ O [7]	0.998	0.992	0.983	1.005	0.656	0.468
МЭГ[8, 9]	1.113	1.099	1.084	21.22	9.696	5.254
[Emim][Cl] [10-13]	1.169	1.153	1.138	1565	758	175
АЭБК [3,14]	1.191	1.174	1.157	1432	329.6	105.6

Таблица 4 – Расчет коэффициента динамической вязкости трехкомпонентной смеси изопропанол (IPA)-вода (H₂O)-экстрагентTable 4 – Calculation of dynamic viscosity coefficient of three-component mixture isopropanol (IPA)-water (H₂O)-extragent

Расчет по выражению (2)				Ошибка (с эксп.), %			AspenPlus V12	Ошибка, %
	EmimCl	ЭГ	АЭБК	EmimCl	ЭГ	АЭБК	ЭГ	
T, °C	95% мас. IPA, 5% H ₂ O							
20	2.972	2.745	2.155	20.8	17.4	37.5	2.735	0.37
40	1.679	1.525	1.224	19.9	16.4	34.6	1.534	0.59
60	0.984	0.927	0.753	22.3	13.8	31.9	0.929	0.28
	88% мас. IPA, 12% H ₂ O							
20	2.487	2.343	1.867	36.4	34.9	52.1	2.344	0.04
40	1.442	1.336	1.088	32.7	30.8	47.1	1.349	0.96
60	0.873	0.834	0.689	33.0	25.9	43.4	0.838	0.48
	5% мас. IPA, 95% H ₂ O							
20	1.169	1.161	1.029	30.1	36.9	-	1.179	1.53
40	0.757	0.745	0.669	26.9	32.2	-	0.760	2.03
60	0.527	0.524	0.476	26.5	29.3	-	0.529	1.06

Таблица 5 – Расчет плотности трехкомпонентной смеси изопропанол (IPA)-вода (H₂O)-экстрагентTable 5 – Calculation of the density of the three-component mixture isopropanol (IPA)-water (H₂O)-extragent

Расчет по выражению (1)				Ошибка (с эксп.), %			AspenPlusV12	Ошибка, %
	Emim Cl	ЭГ	АЭБК	Emim Cl	ЭГ	АЭБК	ЭГ	
T, °C	95% мас. IPA, 5% H ₂ O							
20	0.834	0.829	0.835	0.580	0.335	0.121	0.838	-1.074
40	0.817	0.813	0.818	0.663	0.305	0.085	0.816	-0.391
60	0.801	0.797	0.802	0.529	0.013	0.216	0.792	0.546
	88% мас. IPA, 12% H ₂ O							
20	0.845	0.841	0.847	0.829	0.886	0.782	0.853	-1.414
40	0.829	0.824	0.830	0.863	0.790	0.695	0.830	-0.670
60	0.813	0.809	0.814	0.692	0.470	0.383	0.806	0.301
	5% мас. IPA, 95% H ₂ O							
20	1.008	1.002		0.139	0.691		1.004	-0.191
40	1.001	0.994		0.124	0.678		0.984	1.022
60	0.990	0.984		0.100	0.717		0.964	2.086

Обсуждение полученных результатов

Как видно из представленных в таблице 4 результатов расчета плотности трехкомпонентных смесей, расхождение экспериментальных и рассчитанных по выражению (1) данных не превышает 1% (макс. 0,886%), что говорит о хорошей точности выражения (1) для оценки плотности подобных смесей. Проведенное сравнение расчетных данных по выражению (1) с расчетными данными для смеси с ЭГ из AspenPlus показало сопоставимую, но несколько худшую точность, результаты расчетов расходятся максимум на 2,08%. Следовательно, расчет плотности исследуемых в работе систем не требует корректировки при выполнении моделирования процесса разделения в колонне экстрактивной ректификации.

Если анализировать результаты расчета коэффициента динамической вязкости для исследуемых систем, то здесь наблюдается иная картина. Как видно из представленных в таблице 5 результатов расчета, расхождение экспериментальных и рассчитанных по выражению (2) данных лежит в диапазоне от 13,8 до 52%, в среднем же ошибка составляет порядка 30%. Необходимо отметить, что во всех случаях наблюдается занижение расчетных данных по сравнению с экспериментальными данными. Сравнение же полученных результатов по выражению (2) с расчетными данными для смеси с ЭГ из AspenPlus показывает сопоставимую точность, максимальное расхождение достигает 2%. В AspenPlus для моделирования вязкости смесей заложено выражение (2), но там имеется возможность использовать и расширенное выражение для вязкости смеси, но это требует использования параметров бинарного взаимодействия, которые в пакете отсутствуют (по умолчанию стоят значения равные 0). Следовательно, моделирование коэффициента динамической вязкости по выражению (2) является для исследуемых систем довольно грубым и требует соответствующей корректировки.

Также необходимо отметить особенность расчетов по выражению (2) коэффициента динамической вязкости для водно-спиртовой смеси с АЭБК. Как видно из таблицы 5, полученные значения оказались меньше, чем даже для случая с ЭГ. Дело в том, что молекулярная масса используемого АЭБК является наибольшей из всех рассматриваемых экстрактивных агентов и составляет 1998,21 г/моль [3], в то время как для [Emim][Cl] - 146,62 г/моль, для ЭГ - 62,068 г/моль. При использовании выражения (2) необходим перерасчет в молярные концентрации, что дает значение концентрации АЭБК порядка 0,1399 % мол. В результате влияние вязкости АЭБК по выражению (2) оказывается пренебрежимо мало и вязкость смеси определяется вязкостью изопропанола и воды.

Большие ошибки при определении вязкости трехкомпонентных смесей по выражению (2) в сторону занижения повлекут за собой ошибки в определение на ее основе, с использованием соответствующих корреляций, параметров тепло- и массообменных процессов. Поэтому, в случае моделирования подобных систем, потребуется проводить дополнительную

настройку расчета вязкости. Если рассмотреть влияние данного фактора на моделирование процесса экстрактивной ректификации, что было показано в работе [1], то не учет данного фактора может привести в итоге к неправильному определению ВЭТС используемых контактных устройств и как следствие размеров колонны. В работе [1] показано, что использование экстрактивного агента с высокой вязкостью привело к уменьшению теоретических тарелок в экспериментальной колонне или другими словами снижению эффективности разделения из-за изменения кинетики процесса массообмена в жидкой фазе на 35%.

Выводы

Проведенные в работе исследования показали, что моделирование плотности смеси по выражению (1) для исследуемых систем является достаточно точным, расхождение экспериментальных и расчетных данных не превышает 1%.

Моделирование коэффициента динамической вязкости системы по модели Кендалла–Манро (2) для смеси изопропанол-вода в присутствии исследуемых экстрактивных агентов может приводить к существенным ошибкам, максимальное значение достигает 52%. Получаемые расчетные значения коэффициента динамической вязкости получаются заниженными, что в свою очередь может привести к ошибкам при моделировании на основе этих свойств процессов тепло- и массообмена, протекающих в аппарате. Поэтому, в случае моделирования подобных многокомпонентных систем, потребуется проводить дополнительную настройку расчета коэффициента динамической вязкости по экспериментальным данным, например, используя взамен метода Кендалла–Манро метод Макалестера [4,15].

Литература

1. A.V. Klinov, A.V. Malygin, A.R. Khairullina, A.R. Davletbaeva, O.O. Sazonov, I.P. Anashkin, I.M. Davletbaeva. *ChemEngineering*. **5**, 71 (2021). doi.org/10.3390/chemengineering5040071
2. А.В. Малигин, А.Р. Хайруллина, А.Р. Сафина, О.В. Томина, Я.В. Ившин, А.В. Клинов, Вестник Технологического университета, **26**, 8, 36–40 (2023).
3. I.M. Davletbaeva, A.V. Klinov, A.R. Khairullina, A.V. Malygin, S.E. Dulmaev, A.R. Davletbaeva, T.A. Mukhametzyanov, *Processes* **8**, 628 (2020) <https://doi.org/10.3390/pr8050628>.
4. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей – 1982. 592 с.
5. F. Kermanpour, H. Z. Niakan, T. Sharifi. *J. Chem. Eng. Data*, **58**, 1086–1091 (2013).
6. F.-M. Pang, C.-E. Seng, T.-T. Teng, M.H. Ibrahim, *J. Mol. Liq.*, **136**, 71–78 (2007).
7. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей/2-е изд., доп. и перераб. - М.: Наука, 1972. 720 с.
8. O. Ciocirlan, O. Croitoru, O. J. Iulian, *Chem. Eng. Data*, **59**, 1165–1174 (2014).
9. V. Losetty, C. D. Wilfred, M. C. Shekar, *J. Mol. Liq.*, **224**, 480–491 (2016).
10. A.V. Klinov, A.V. Malygin, L.R. Minibaeva, M.V. Fedorov, *Russian Journal of Physical Chemistry A*. **88**, 10, 1682–1688 (2014).

11. Monika Souckova, Jaroslav Klomfar, Jaroslav Patek, *Fluid Phase Equilib.* **454**, 43-56 (2017).
12. K. R. Seddon, A. Stark, M.-J. Torres, *ACS Symp. Ser.* 819, 34-49 (2002).
13. T. Chen, M. Chidambaram, Z. Liu, B. Smit, A. T. Bell, *J. Phys. Chem. B* 136, 17, 5790-5794 (2010).
14. A.V. Klinov, A.V. Malygin, A.R. Khairullina, S.E. Dulmaev, I.M. Davletbaeva, *Processes* **8**, 1466 (2020) <https://doi.org/10.3390/pr8111466>.
15. C. Kandpal, J.D. Pandey, R. Dey, A.K. Singh, V.K. Singh, *Journal of Molecular Liquids*, **333**, 115858 (2021)

References

1. A.V. Klinov, A.V. Malygin, A.R. Khairullina, A.R. Davletbaeva, O.O. Sazonov, I.P. Anashkin, I.M. Davletbaeva. *ChemEngineering*. **5**, 71 (2021). doi.org/10.3390/chemengineering5040071.
2. A.V. Malygin, A.R. Khairullina, A.R. Safina, O.V. Tomina, Y.V. Ivshin, A.V. Klinov, *Herald of Technological University*, 26, 8, 36-40 (2023).
3. I.M. Davletbaeva, A.V. Klinov, A.R. Khairullina, A.V. Malygin, S.E. Dulmaev, A.R. Davletbaeva, T.A. Mukhametzyanov, *Processes* **8**, 628 (2020) <https://doi.org/10.3390/pr8050628>.
4. Reed R., Prausnitz J., Sherwood T. *Properties of gases and liquids* - 1982. 592 p.

5. F. Kermanpour, H. Z. Niakan, T. Sharifi. *J. Chem. Eng. Data*, **58**, 1086-1091 (2013).
6. F.-M. Pang, C.-E. Seng, T.-T. Teng, M.H. Ibrahim, *J. Mol. Liq.*, **136**, 71-78 (2007).
7. Vargaftik N.B. *Reference book on thermophysical properties of gases and liquids* / 2nd edition, supplement and revision. - Moscow: Nauka, 1972. 720 p.
8. O. Ciocirlan, O. Croitoru, O. J. Iulian, *Chem. Eng. Data*, **59**, 1165-1174 (2014).
9. V. Losetty, C. D. Wilfred, M. C. Shekar, *J. Mol. Liq.*, **224**, 480-491 (2016).
10. A.V. Klinov, A.V. Malygin, L.R. Minibaeva, M.V. Fedorov, *Russian Journal of Physical Chemistry A*. **88**, 10, 1682-1688 (2014).
11. Monika Souckova, Jaroslav Klomfar, Jaroslav Patek, *Fluid Phase Equilib.* **454**, 43-56 (2017).
12. K. R. Seddon, A. Stark, M.-J. Torres, *ACS Symp. Ser.* 819, 34-49 (2002).
13. T. Chen, M. Chidambaram, Z. Liu, B. Smit, A. T. Bell, *J. Phys. Chem. B* 136, 17, 5790-5794 (2010).
14. A.V. Klinov, A.V. Malygin, A.R. Khairullina, S.E. Dulmaev, I.M. Davletbaeva, *Processes* **8**, 1466 (2020) <https://doi.org/10.3390/pr8111466>.
15. C. Kandpal, J.D. Pandey, R. Dey, A.K. Singh, V.K. Singh, *Journal of Molecular Liquids*, **333**, 115858 (2021).

© **А. В. Малыгин** – доц. каф. процессов и аппаратов химической технологии, КНИТУ, mav@kstu.ru; **А. В. Клинов** – зав. кафедрой той же кафедры, alklin@kstu.ru; **А. Р. Хайруллина** – ассистент той же кафедры, KhAlina@kstu.ru; **А. Р. Сафина** – студент гр. 2221-41, КНИТУ.

© **А. В. Малыгин** – Associated Professot, Department of Processes and Apparatuses of Chemical Technology (PACT), Kazan National Research Technological University (KNRTU), mav@kstu.ru; **А. В. Клинов** – Head of the PACT department, KNRTU, alklin@kstu.ru; **А. Р. Хайруллина** – Assistant of the PACT department, KNRTU, KhAlina@kstu.ru; **А. Р. Сафина** – Student, group 2221-41, KNRTU.