

УДК 538.93 : 532.1

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-87-104>



## Плотность, тепловое расширение, динамическая вязкость галогенозамещенных аренов

А. С. Громков<sup>1</sup>, Н. М. Игнатенко<sup>1✉</sup>, Г. А. Мельников<sup>1</sup>, В. В. Сучилкин<sup>1</sup>,  
О. А. Манжос<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: [inmkstu@bk.ru](mailto:inmkstu@bk.ru)

### Резюме

**Цель.** Экспериментальное исследование плотности, теплового расширения и динамической вязкости галогенозамещенных аренов при температурах от 293,15 до 343,15 К и атмосферном давлении 97,992 кПа.

**Методы.** Плотность определялась пикнометрическим методом, вязкость – капиллярным методом. Использовались кварцевый пикнометр типа ПЖ2 номинальной вместимостью 10 мл и стеклянный капиллярный вискозиметр типа ВПЖ-2 с номинальным диаметром капилляра 0,34 мм. Измерение массы жидкостей осуществлялось с помощью электронных весов ВСЛ-200/0,1А с ценой деления 0,0001 г. Для обработки экспериментальных результатов применялись численные методы.

**Результаты.** Получены экспериментальные данные по плотности, коэффициенту объемного теплового расширения и динамической вязкости жидких о-ксилола, этилбензола, фторбензола, хлорбензола, бромбензола, толуола, о-фтортолуола, м-фтортолуола, п-фтортолуола, о-хлортолуола, м-хлортолуола, п-хлортолуола, 2,4-дихлортолуола, 2,6-дихлортолуола. Данные по плотности и динамической вязкости аппроксимированы полиномом третьей степени. Данные по коэффициенту объемного теплового расширения получены на основе аппроксимированных данных измеренной плотности. Максимальная оценка погрешности измерений для плотности составила 0,13%, для динамической вязкости – 3,5%. Максимальная погрешность вычислений для коэффициента теплового расширения оценивается в 3%.

**Заключение.** Математическая обработка полученных экспериментальных данных по плотности и динамической вязкости позволила получить аналитические соотношения в виде степенных полиномов, позволяющих вычислять значения этих величин при любой температуре из исследованного интервала температур и атмосферном давлении с погрешностью, не превосходящей погрешности экспериментального определения. Рассчитанные значения хорошо согласуются с данными, приведенными в справочной и научной литературе. Полученные экспериментальные данные дополняют информацию о свойствах некоторых рассмотренных жидкостей, для которых зависимости плотности и вязкости от температуры мало изучены. Исследуемые вещества используются в различных отраслях экономики, поэтому являются технически важными жидкостями. Результаты измерений могут использоваться в физике конденсированного состояния, для анализа жидких углеводородов, и могут быть полезны в химической промышленности.

**Ключевые слова:** бензол; толуол; о-ксилол; этилбензол; галогенозамещенные; плотность; тепловое расширение; динамическая вязкость.

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность кафедре фундаментальной химии и химической технологии ЮЗГУ и лично кандидату химических наук, доценту, заведующему кафедрой Н. В. Кувардину за оказанную помощь при проведении настоящего исследования.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Плотность, тепловое расширение, динамическая вязкость галогенозамещенных аренов / А. С. Громков, Н. М. Игнатенко, Г. А. Мельников, В. В. Сучилкин, О. А. Манжос // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 3. С. 87–104. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-87-104>

Поступила в редакцию 24.06.2024

Подписана в печать 01.08.2024

Опубликована 24.09.2024

## Density, thermal expansion, dynamic viscosity of halogenated arenes

Andrey S. Gromkov<sup>1</sup>, Nikolay M. Ignatenko<sup>1</sup>✉, Gennady A. Melnikov<sup>1</sup>,  
Vadim V. Suchilkin<sup>1</sup>, Olga A. Manzhos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: [inmkstu@bk.ru](mailto:inmkstu@bk.ru)

### Abstract

**Purpose.** Experimental study of the density, thermal expansion and dynamic viscosity of halogenated arenes at temperatures from 293.15 to 343.15 K and atmospheric pressure 97.992 kPa.

**Methods.** Density was determined by the pycnometric method, viscosity by the capillary method. A quartz pycnometer type PZh2 with a nominal capacity of 10 ml and a glass capillary viscometer type VPZh-2 with a nominal capillary diameter of 0.34 mm were used. The mass of liquids was measured using an electronic scale VSL-200/0.1A with a division value of 0.0001 g. Numerical methods were used to process the experimental results.

**Results.** Experimental data were obtained on the density, coefficient of volumetric thermal expansion and dynamic viscosity of liquid *o*-xylene, ethylbenzene, fluorobenzene, chlorobenzene, bromobenzene, toluene, *o*-fluorotoluene, *m*-fluorotoluene, *p*-fluorotoluene, *o*-chlorotoluene, *m*-chlorotoluene, *p*-chlorotoluene, 2,4-dichlorotoluene, 2,6-dichlorotoluene. Density and dynamic viscosity data are approximated by a third-degree polynomial. Data on the coefficient of volumetric thermal expansion are obtained from approximated measured density data. The maximum estimate of the measurement error for density was 0.13 %, for dynamic viscosity – 3.5 %. The maximum calculation error for the coefficient of thermal expansion is estimated at 3 %.

**Conclusion.** Mathematical processing of the obtained experimental data on density and dynamic viscosity made it possible to obtain analytical relations in the form of power polynomials that allow calculating the values of these quantities at any temperature from the studied temperature range and atmospheric pressure with an error not exceeding the error of experimental determination. The calculated values are in good agreement with the data provided in the reference and scientific literature. The experimental data obtained complement the information on the properties of some of the liquids under consideration, for which the dependences of density and viscosity on temperature are poorly understood. The substances under study are used in various sectors of the economy and are therefore technically important liquids. The measurement results can be used in condensed matter physics, for the analysis of liquid hydrocarbons, and can be useful in the chemical industry.

**Keywords:** benzene; toluene; *o*-xylene; ethylbenzene; halogenated; density; thermal expansion; dynamic viscosity.

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology of SWSU and personally to the Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, head of the Department Kuvardin N. V. for assistance provided during this study.

**Conflict of interest:** The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Gromkov A.S., Ignatenko N.M., Melnikov G. A., Suchilkin V.V., Manzhos O.A. Density, thermal expansion, dynamic viscosity of halogenated arenes. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(3):87–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-87-104>

Received 24.06.2024

Accepted 01.08.2024

Published 24.09.2024

\*\*\*

## Введение

На данный момент существует большое число исследований термодинамических свойств чистых органических жидкостей и их смесей. Из недавних можно привести работы Mohammadi и Hamzehloo [1], Nawary и Meier [2], Zeqiraj и др. [3], Aliaj и др. [4] Несмотря на это термодинамические свойства галогенозамещенных углеводородов мало изучены. Термодинамические данные либо отсутствуют, либо приводимые в справочной и научной литературе значения имеют большой разброс. Расхождение имеющихся данных, превышающее суммарную погрешность экспериментального определения величин, можно объяснить различной чистотой исследованных материалов, применением различных методов измерения и расчета для определения свойств веществ, погрешностью экспериментальной аппаратуры и т. д. Знание физико-химических свойств веществ при различных составах и условиях, температурах и давлениях играет важную роль в оптимизации химических процессов. Производство, применение и утилизация галогенозамещенных углеводородов связано с экологическими проблемами. Изучение таких объектов позволяет приблизиться к пониманию структуры жидкого состояния вещества в целом, что имеет фундаментальное значение для развития физики конденсированного состояния.

## Материалы и методы

В настоящей работе приводятся результаты исследований 15 жидкостей:

бензола, толуола и их галогенозамещенных. Температуры плавления  $T_{пл}$  и кипения  $T_{кип}$ , критические температура  $T_{кр}$ , давление  $p_{кр}$  и плотность  $\rho_{кр}$ , плотность при 293,15 К  $\rho_{293,15}$  и другая информация об исследованных веществах представлены в таблице 1. Указанные вещества являются технически важными жидкостями. Бензол является исходным веществом для синтеза многих органических соединений. Его производные используются для производства растворителей, красителей, полимеров, лекарств и др.

Измерение плотности проводилось пикнометрическим методом с использованием кварцевого пикнометра типа ПЖ2 номинальной вместимостью 10 мл. Измерение вязкости проводилось капиллярным методом. Использовался стеклянный капиллярный вискозиметр типа ВПЖ-2 с номинальным диаметром капилляра 0,34 мм. Измерение массы жидкостей осуществлялось с помощью электронных весов ВСЛ-200/0,1А с ценой деления 0,0001 г. Поддержание и регулировка необходимой температуры при определении плотности и вязкости осуществлялось с помощью вискозиметрического термостата LOIP LT-910. Время истечения жидкости фиксировалось электронным секундомером.

В качестве жидкости для калибровки пикнометра и вискозиметра был выбран бензол, т. к. исследования плотности и вязкости бензола при различных условиях проводились множество раз разными авторами.

Таблица 1. Некоторые характеристики исследованных веществ

Table 1. Some characteristics of the studied substances

Название вещества (номер CAS)	$T_{пл}$ , К	$T_{кип}$ , К	$T_{кр}$ , К	$p_{кр}$ , МПа	$\rho_{кр}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{293,15}$ , кг/м <sup>3</sup>	Произво- дитель	Чистота
Бензол (71-43-2)	278,65	353,25	562,02	4,89	304,8	878,0	Panreac	0,999
Толуол (108-88-3)	178,15	383,75	591,75	4,13	292,0	867,0	–	–
<i>o</i> -Ксилол (95-47-6)	247,99	417,65	630,26	3,74	287,7*	880,1	Thermo Fisher Scientific	0,989
Этилбензол (100-41-4)	178,15	409,37	617,1	3,61	283,9*	867,0	Alfa Aesar	0,998
Фторбензол (462-06-6)	231,93	358,26	560,1	4,34**	357,6***	1022,5	Acros Organics	0,999
Хлорбензол (108-90-7)	227,55	404,15	632,35	4,52	364,7***	1105,8	Acros Organics	0,999
Бромбензол (108-86-1)	242,55	429,35	670,15	4,52	405,7**	1495,2	Acros Organics	0,999
<i>o</i> -Фтортолуол (95-52-3)	211,15	387,15	586,4**	3,74**	328,7**	1004,0	Alfa Aesar	0,998
<i>m</i> -Фтортолуол (352-70-5)	185,43	389,15	589,5**	3,74**	328,7**	998,6	Thermo Fisher Scientific	0,995
<i>n</i> -Фтортолуол (352-32-9)	216,37	389,76	590,4**	3,74**	328,7**	1000,7	Alfa Aesar	0,998
<i>o</i> -Хлортолуол (95-49-8)	238,04	432,12	654,25	3,86**	345,8**	1082,5	Alfa Aesar	0,999
<i>m</i> -Хлортолуол (108-41-8)	225,37	435,37	660,3**	3,86**	345,8**	1072,2	Alfa Aesar	0,995
<i>n</i> -Хлортолуол (106-43-4)	280,65	435,55	658,85	3,86**	345,8**	1069,7	Acros Organics	0,999
2,4-Дихлортолуол (95-73-8)	259,65	473,15	703,5**	3,55**	388,0**	1249,8	Acros Organics	0,999
2,6-Дихлортолуол (118-69-4)	275,95	471,15	700,5**	3,55**	388,0**	1268,6	Acros Organics	0,999

\* Рассчитано как отношение молярной массы к критическому молярному объему.

\*\* Рассчитано по методике Лидерсена.

\*\*\* Рассчитано как произведение критической плотности (моль/м<sup>3</sup>) на молярную массу (кг/моль)

В работе [5] представлено уравнение состояния для термодинамических свойств бензола, выраженное через энергию Гельмгольца как функция температуры и плотности. Расчет плотности бензола по этому уравнению можно выполнить с помощью сайта (<https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>). Результаты расчета при температурах от 293,15 до

343,15 К и атмосферном давлении 97,992 кПа по предложенному уравнению состояния представлены в таблице 2. Оценка неопределенности плотности жидкого бензола составляет 0,1%. В настоящем исследовании калибровка пикнометра и вискозиметра проводилась с учетом этих значений.

**Таблица 2.** Плотность бензола при температурах от 293,15 до 343,15 К и атмосферном давлении**Table 2.** Density of benzene at temperatures from 293.15 to 343.15 K and atmospheric pressure

Температура, К	293,15	303,15	313,15	323,15	333,15	343,15
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	878,9142	868,3812	857,7588	847,0267	836,1648	825,1519

В работе [6] предложено соотношение для расчета динамической вязкости бензола. Расчет вязкости бензола по этому соотношению можно выполнить с помощью сайта (<https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>). Результаты расчета при температурах от 293,15 до 343,15 К и ат-

мосферном давлении 97,992 кПа по предложенному соотношению представлены в таблице 3. Оценка неопределенности динамической вязкости жидкого бензола составляет 1,8%. В настоящем исследовании калибровка вискозиметра проводилась с учетом этих значений.

**Таблица 3.** Динамическая вязкость бензола при температурах от 293,15 до 343,15 К и атмосферном давлении**Table 3.** Dynamic viscosity of benzene at temperatures from 293.15 to 343.15 K and atmospheric pressure

Температура, К	293,15	303,15	313,15	323,15	333,15	343,15
Вязкость, мПа·с	647,3650	563,4408	495,9788	440,5481	394,1776	354,8017

Вычисление плотности (кг/м<sup>3</sup>) исследуемых жидкостей при температуре  $T$  проводилось по формуле

$$\rho_T = \frac{m_T - m_0}{m_{к.Т} - m_0} (\rho_{к.Т} - \rho_{возд}) + \rho_{возд}, \quad (1)$$

где  $m_T$  – масса пикнометра с исследуемой жидкостью при температуре  $T$ , кг;  $m_0$  – масса пустого пикнометра, кг;  $m_{к.Т}$  – масса пикнометра с калибровочной жидкостью при температуре  $T$ , кг;  $\rho_{к.Т}$  – плотность калибровочной жидкости при температуре  $T$ , кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{возд}$  – плотность окружающего воздуха при взвешивании равная 1,2 кг/м<sup>3</sup>.

Оценка погрешности измерения плотности проводилась по формуле

$$\varepsilon_{\rho,T} = \frac{\Delta\rho_T}{\rho_T}, \quad (2)$$

где

$$\Delta\rho_T = \left( \frac{\Delta m_T + \Delta m_0}{m_T - m_0} + \frac{\Delta m_{к.Т} + \Delta m_0}{m_{к.Т} - m_0} + \frac{\Delta\rho_{к.Т} + \Delta\rho_{возд}}{\rho_{к.Т} - \rho_{возд}} \right) \times \\ \times \frac{m_T - m_0}{m_{к.Т} - m_0} (\rho_{к.Т} - \rho_{возд}) + \Delta\rho_{возд};$$

$\Delta m_T$ ,  $\Delta m_0$ ,  $\Delta m_{к.Т}$  принимались равными цене деления весов 10<sup>-7</sup> кг;  $\Delta\rho_{к.Т}$  принималось равным 0,9 кг/м<sup>3</sup> в соответствии с заявленной неопределенностью в 0,1%;  $\Delta\rho_{возд}$  принималось равным половине последнего разряда значения 0,05 кг/м<sup>3</sup>.

Вычисление коэффициента объемного теплового расширения (К<sup>-1</sup>) исследуемых жидкостей при температуре  $T$  проводилось по формуле

$$\alpha_{\rho,T} = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = \rho_T \left( \frac{\partial}{\partial T} \frac{1}{\rho_T} \right)_p = \\ = -\frac{1}{\rho_T} \left( \frac{\partial \rho_T}{\partial T} \right)_p. \quad (3)$$

Погрешность вычисления коэффициента объемного теплового расширения

оценивалась как минимум на порядок больше погрешности измерения плотности.

Вычисление динамической вязкости (мПа·с) исследуемых жидкостей при температуре  $T$  проводилось по формуле

$$\eta_T = \frac{\eta_{к.T}}{\rho_{к.T} \tau_{к.T}} \rho_T \tau_T, \quad (4)$$

где  $\eta_{к.T}$  – динамическая вязкость калибровочной жидкости при температуре  $T$ , мПа·с;  $\tau_{к.T}$  – время истечения калибровочной жидкости при температуре  $T$ , с;  $\tau_T$  – время истечения исследуемой жидкости при температуре  $T$ , с.

Оценка погрешности измерения динамической вязкости проводилась по формуле

$$\varepsilon_{\eta,T} = \frac{\Delta\eta_T}{\eta_T} = \frac{\Delta\eta_{к.T}}{\eta_{к.T}} + \frac{\Delta\rho_{к.T}}{\rho_{к.T}} + \frac{\Delta\tau_{к.T}}{\tau_{к.T}} + \frac{\Delta\rho_T}{\rho_T} + \frac{\Delta\tau_T}{\tau_T}, \quad (5)$$

где  $\Delta\eta_{к.T}/\eta_{к.T}$  принималось равным 1,8% в соответствии с заявленной неопределенностью;  $\Delta\rho_{к.T}/\rho_{к.T}$  принималось равным 0,1% в соответствии с заявленной неопределенностью;  $\Delta\tau_{к.T}$ ,  $\Delta\tau_T$  принимались равными 1 с.

### Результаты и их обсуждение

Результаты измерения плотности исследуемых веществ при температурах от 293,15 до 343,15 К и атмосферном давлении представлены в таблице 4. Максимальное значение оценки погрешности измерения плотности  $\varepsilon_{\rho,\max}$  составила 0,13%.

**Таблица 4.** Экспериментальные значения плотности исследованных веществ

**Table 4.** Experimental density values of the studied substances

Название вещества	Плотность, кг/м <sup>3</sup> , при температуре, К					
	293,15	303,15	313,15	323,15	333,15	343,15
Толуол	868,6	859,3	850,3	840,8	831,2	821,1
<i>o</i> -Ксилол	880,9	872,6	864,4	855,9	847,1	838,3
Этилбензол	868,9	860,5	851,7	843,3	834,1	824,7
Фторбензол	1023,6	1012,1	1000,0	987,6	975,2	962,5
Хлорбензол	1106,0	1095,9	1085,0	1074,5	1063,5	1052,0
Бромбензол	1492,8	1480,2	1466,8	1453,4	1439,9	1425,3
<i>o</i> -Фтортолуол	1002,7	992,3	981,5	971,1	959,9	948,4
<i>m</i> -Фтортолуол	996,8	986,8	976,1	965,5	955,1	943,2
<i>n</i> -Фтортолуол	996,9	986,8	976,3	965,3	954,7	943,1
<i>o</i> -Хлортолуол	1080,0	1070,6	1061,0	1051,7	1041,6	1030,9
<i>m</i> -Хлортолуол	1070,6	1061,4	1051,7	1041,7	1031,9	1021,4
<i>n</i> -Хлортолуол	1068,1	1059,0	1049,4	1039,3	1029,6	1019,4
2,4-Дихлортолуол	1249,1	1238,9	1228,4	1218,1	1207,8	1196,4
2,6-Дихлортолуол	1263,7	1253,4	1243,3	1232,8	1222,1	1211,3

Плотности мета- и параконфигураций веществ очень близки. В нашем случае значения плотностей *m*-фтортолуола и *n*-фтортолуола практически совпали. Это может говорить или о наличии небольшой систематической ошибки, или что для измерения таких веществ нужно использовать оборудование с большей точностью.

Полученные результаты были аппроксимированы полиномом третьей степени

$$\rho_T = a_0 + a_1(T - 273,15) + a_2(T - 273,15)^2 + a_3(T - 273,15)^3. \quad (6)$$

Коэффициенты  $a_i$  в формуле (6) представлены в таблице 5.

**Таблица 5.** Коэффициенты  $a_i$  в формуле (6)

**Table 5.** Coefficients  $a_i$  in formula (6)

Название вещества	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
Толуол	$8,872458 \cdot 10^2$	$-9,596042 \cdot 10^{-1}$	$1,661300 \cdot 10^{-3}$	$-2,065139 \cdot 10^{-5}$
<i>o</i> -Ксилол	$8,965711 \cdot 10^2$	$-7,682776 \cdot 10^{-1}$	$-9,105051 \cdot 10^{-4}$	$-4,022202 \cdot 10^{-8}$
Этилбензол	$8,866664 \cdot 10^2$	$-9,215534 \cdot 10^{-1}$	$2,305532 \cdot 10^{-3}$	$-2,548239 \cdot 10^{-5}$
Фторбензол	$1,044906 \cdot 10^3$	$-9,881389 \cdot 10^{-1}$	$-4,186023 \cdot 10^{-3}$	$2,124707 \cdot 10^{-5}$
Хлорбензол	$1,126181 \cdot 10^3$	$-9,978777 \cdot 10^{-1}$	$-3,507696 \cdot 10^{-4}$	$-7,596794 \cdot 10^{-6}$
Бромбензол	$1,518363 \cdot 10^3$	$-1,274291$	$3,933834 \cdot 10^{-4}$	$-1,660900 \cdot 10^{-5}$
<i>o</i> -Фтортолуол	$1,024590 \cdot 10^3$	$-1,132674$	$2,621875 \cdot 10^{-3}$	$-2,839438 \cdot 10^{-5}$
<i>m</i> -Фтортолуол	$1,018237 \cdot 10^3$	$-1,109134$	$2,718664 \cdot 10^{-3}$	$-3,089580 \cdot 10^{-5}$
<i>n</i> -Фтортолуол	$1,016445 \cdot 10^3$	$-9,512790 \cdot 10^{-1}$	$-1,261400 \cdot 10^{-3}$	$-1,431136 \cdot 10^{-6}$
<i>o</i> -Хлортолуол	$1,100699 \cdot 10^3$	$-1,119690$	$5,264120 \cdot 10^{-3}$	$-5,021230 \cdot 10^{-5}$
<i>m</i> -Хлортолуол	$1,088755 \cdot 10^3$	$-8,846399 \cdot 10^{-1}$	$-1,017380 \cdot 10^{-3}$	$-1,060369 \cdot 10^{-6}$
<i>n</i> -Хлортолуол	$1,084426 \cdot 10^3$	$-7,357649 \cdot 10^{-1}$	$-4,588574 \cdot 10^{-3}$	$2,631649 \cdot 10^{-5}$
2,4-Дихлортолуол	$1,271539 \cdot 10^3$	$-1,200036$	$4,807979 \cdot 10^{-3}$	$-4,256566 \cdot 10^{-5}$
2,6-Дихлортолуол	$1,284075 \cdot 10^3$	$-1,022895$	$3,835427 \cdot 10^{-4}$	$-8,888891 \cdot 10^{-6}$

В таблице 6 приведено сравнение рассчитанных значений плотности по формуле (6) с литературными данными других авторов. Наблюдается хорошее согласие рассчитанных значений с литературными данными.

В соответствии с (3) и (6) коэффициент объемного теплового расширения  $\alpha_{p,T}$  вычислялся по формуле

$$\alpha_{p,T} = -\frac{a_1 + 2a_2\tau + 3a_3\tau^2}{a_0 + a_1\tau + a_2\tau^2 + a_3\tau^3}, \quad (7)$$

где  $\tau = T - 273,15$ .

Результаты вычисления  $\alpha_{p,T}$  исследуемых веществ при температурах от 293,15 до 343,15 К и атмосферном давлении представлены в таблице 7. Максимальное значение погрешности вычисления коэффициента объемного теплового расширения  $\varepsilon_{\alpha,max}$  оценивается в 3%.

Таблица 6. Сравнение рассчитанных и литературных данных по плотности

Table 6. Comparison of calculated and literature data on density

Источник, год	Плотность, кг/м <sup>3</sup> , при температуре, К										
	293,15	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15	323,15	328,15	333,15	338,15	343,15
Толуол											
[7], 2007	866,72	862,22	857,80	853,44	849,19	845,08	841,24	–	–	–	–
[8], 2009	–	862,214	857,552	852,858	848,360	–	–	–	–	–	–
[9], 2013	–	–	857,4	853,1	848,7	–	–	–	–	–	–
[10], 2014	–	862,21	857,55	852,89	848,36	–	–	–	–	–	–
Расчет по (6)	868,6	864,0	859,4	854,8	850,2	845,5	840,8	836,1	831,2	826,2	821,1
о-Ксилол											
[11], 2007	–	875,11	870,85	–	862,58	–	854,21	–	845,26	–	836,68
[8], 2009	–	875,839	871,742	867,540	863,174	–	–	–	–	–	–
[12], 2010	–	875,96	871,61	867,24	862,75	–	–	–	–	–	–
[9], 2013	–	–	870,9	867,2	862,9	–	–	–	–	–	–
Расчет по (6)	880,8	876,8	872,7	868,6	864,4	860,2	855,9	851,6	847,2	842,8	838,3
Этилбензол											
[7], 2007	867,37	863,12	858,94	854,85	850,86	847,01	843,39	–	–	–	–
Расчет по (6)	869,0	864,7	860,4	856,1	851,9	847,6	843,2	838,7	834,2	829,5	824,7
Фторбензол											
[13], 2006	–	1019,08	–	–	–	–	–	–	–	–	–
[7], 2007	1024,83	1019,01	1013,28	1007,64	1002,12	996,77	991,66	–	–	–	–
Расчет по (6)	1023,6	1017,9	1012,1	1006,1	1000,0	993,9	987,7	981,4	975,1	968,8	962,5
Хлорбензол											
[7], 2007	1106,04	1100,86	1095,78	1090,83	1086,03	1081,44	1077,15	–	–	–	–
[8], 2009	–	1100,858	1095,459	1089,705	1084,683	–	–	–	–	–	–
[14], 2013	–	1101,03	1095,52	1090,20	–	–	–	–	–	–	–
[15], 2018	–	–	1095,54	1089,72	1084,71	1079,45	–	–	–	–	–
Расчет по (6)	1106,0	1100,9	1095,7	1090,5	1085,2	1079,9	1074,5	1069,0	1063,4	1057,8	1052,0
Бромбензол											
[16], 2008	1493,6	–	–	–	1466,6	–	–	–	1439,4	–	–
[8], 2009	–	1488,272	1481,562	1475,386	1467,088	–	–	–	–	–	–
[14], 2013	–	1488,12	1481,40	1474,58	–	–	–	–	–	–	–
[15], 2018	–	–	1481,52	1475,36	1468,02	1461,36	–	–	–	–	–
Расчет по (6)	1492,9	1486,5	1480,0	1473,5	1467,0	1460,3	1453,6	1446,7	1439,7	1432,6	1425,4
о-Фтортолуол											
[7], 2007	1004,02	998,85	993,76	988,79	983,93	979,24	974,77	–	–	–	–
Расчет по (6)	1002,8	997,5	992,2	986,9	981,7	976,3	971,0	965,5	959,9	954,2	948,4
м-Фтортолуол											
Расчет по (6)	996,9	991,7	986,6	981,4	976,2	971,0	965,7	960,3	954,8	949,1	943,3
п-Фтортолуол											
[17], 2003	–	992,1	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Расчет по (6)	996,9	991,9	986,7	981,5	976,3	971,0	965,5	960,1	954,5	948,9	943,2
о-Хлортолуол											
[18], 2011	–	1077,41	1072,83	1068,24	–	–	–	–	–	–	–
[10], 2014	–	1077,45	1072,54	1067,66	1062,77	–	–	–	–	–	–
[19], 2016	–	–	1072,84	1068,22	1063,34	1058,96	–	–	–	–	–
Расчет по (6)	1080,0	1075,2	1070,5	1065,8	1061,1	1056,4	1051,6	1046,7	1041,6	1036,4	1030,9



## Окончание таблицы 6.

## End of table 6.

Источник, год	Плотность, кг/м <sup>3</sup> , при температуре, К											
	293,15	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15	323,15	328,15	333,15	338,15	343,15	
<i>m</i> -Хлортолуол												
[18], 2011	–	1067,29	1062,81	1058,33	–	–	–	–	–	–	–	–
[10], 2014	–	1070,13	1065,23	1060,33	1055,64	–	–	–	–	–	–	–
[19], 2016	–	–	1062,83	1058,35	1053,14	1048,56	–	–	–	–	–	–
Расчет по (6)	1070,6	1066,0	1061,3	1056,5	1051,7	1046,8	1041,8	1036,8	1031,8	1026,7	1021,5	
<i>n</i> -Хлортолуол												
[18], 2011	–	1065,11	1059,51	1053,90	–	–	–	–	–	–	–	–
[10], 2014	–	1064,55	1059,65	1054,50	1049,58	–	–	–	–	–	–	–
[19], 2016	–	–	1059,54	1053,94	1050,34	1045,68	–	–	–	–	–	–
Расчет по (6)	1068,1	1063,6	1058,9	1054,2	1049,3	1044,4	1039,5	1034,5	1029,4	1024,4	1019,5	
2,4-Дихлортолуол												
[16], 2008	1249,3	–	–	–	1228,4	–	–	–	1207,4	–	–	–
Расчет по (6)	1249,1	1243,9	1238,7	1233,6	1228,5	1223,4	1218,2	1213,0	1207,7	1202,2	1196,5	
2,6-Дихлортолуол												
Расчет по (6)	1263,7	1258,6	1253,5	1248,4	1243,2	1238,0	1232,8	1227,5	1222,2	1216,8	1211,3	

Таблица 7. Сравнение рассчитанных и литературных данных по коэффициенту объемного теплового расширения

Table 7. Comparison of calculated and literature data on the coefficient of volumetric thermal expansion

Источник, год	Коэффициент объемного теплового расширения, 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup> , при температуре, К											
	293,15	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15	323,15	328,15	333,15	338,15	343,15	
Толуол												
[20], 2003	1033	–	1065	–	1097	–	1131	–	1165	–	1201	
[21], 2014	–	1083,2	1091,5	1114,0	–	–	–	–	–	–	–	–
Расчет по (7)	1056,9	1059,4	1065,5	1075,3	1089,0	1106,4	1127,9	1153,4	1183,0	1216,9	1255,1	
<i>o</i> -Ксилол												
[20], 2003	942	–	960	–	978	–	996	–	1015	–	1035	
Расчет по (7)	913,6	928,2	943,1	958,1	973,3	988,7	1004,4	1020,2	1036,3	1052,7	1069,2	
Этилбензол												
[20], 2003	1005	–	1024	–	1044	–	1065	–	1086	–	1108	
Расчет по (7)	989,6	987,7	990,3	997,3	1008,9	1025,2	1046,2	1072,1	1103,0	1139,0	1180,3	
Фторбензол												
Расчет по (7)	1104,0	1137,2	1167,8	1195,8	1221,0	1243,4	1262,9	1279,5	1293,1	1303,7	1311,0	
Хлорбензол												
[20], 2003	936	–	957	–	979	–	1001	–	1024	–	1047	
Расчет по (7)	923,2	935,3	948,6	963,2	979,0	996,0	1014,4	1034,1	1055,1	1077,5	1101,4	
Бромбензол												
[20], 2003	884	–	898	–	912	–	927	–	942	–	957	
Расчет по (7)	856,4	865,0	875,3	887,5	901,6	917,5	935,3	955,1	976,9	1000,7	1026,6	
<i>o</i> -Фтортолуол												
Расчет по (7)	1059,0	1057,5	1060,3	1067,4	1079,0	1095,1	1115,8	1141,3	1171,7	1207,0	1247,4	

## Окончание таблицы 7.

## End of table 7.

Источник, год	Коэффициент объемного теплового расширения, $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , при температуре, К										
	293,15	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15	323,15	328,15	333,15	338,15	343,15
<i>m</i> -Фтортолуол											
Расчет по (7)	1040,7	1039,7	1043,4	1051,9	1065,2	1083,6	1106,9	1135,5	1169,4	1208,8	1253,7
<i>n</i> -Фтортолуол											
Расчет по (7)	1006,6	1025,4	1044,7	1064,5	1084,8	1105,6	1127,0	1148,9	1171,4	1194,4	1218,1
<i>o</i> -Хлортолуол											
[21], 2014	–	848,4	853,8	859,4	–	–	–	–	–	–	–
Расчет по (7)	897,6	884,1	877,6	878,0	885,5	900,2	922,3	951,9	989,1	1034,2	1087,2
<i>m</i> -Хлортолуол											
[21], 2014	–	839,6	822,3	846,6	–	–	–	–	–	–	–
Расчет по (7)	865,5	879,5	893,8	908,4	923,4	938,7	954,4	970,4	986,8	1003,6	1020,7
<i>n</i> -Хлортолуол											
[21], 2014	–	1053,4	1059,0	1064,6	–	–	–	–	–	–	–
Расчет по (7)	831,1	861,1	887,7	910,9	930,6	946,8	959,4	968,3	973,5	974,9	972,4
2,4-Дихлортолуол											
Расчет по (7)	847,6	835,7	828,7	826,8	830,0	838,6	852,4	871,8	896,6	927,1	963,3
2,6-Дихлортолуол											
Расчет по (7)	805,7	810,7	816,8	824,1	832,4	842,0	852,7	864,7	877,8	892,3	908,0

Результаты измерения динамической вязкости исследуемых веществ при температурах от 293,15 до 343,15 К и атмосферном давлении представлены в таб-

лице 8. Максимальное значение оценки погрешности динамической вязкости  $\varepsilon_{\eta, \max}$  составило 3,5%.

Таблица 8. Экспериментальные значения динамической вязкости исследованных веществ

Table 8. Experimental values of dynamic viscosity of the studied substances

Название вещества	Динамическая вязкость, мПа·с, при температуре, К					
	293,15	303,15	313,15	323,15	333,15	343,15
Толуол	0,583	0,514	0,465	0,428	0,389	0,355
<i>o</i> -Ксилол	0,795	0,692	0,616	0,562	0,506	0,458
Этилбензол	0,664	0,586	0,527	0,487	0,445	0,403
Фторбензол	0,577	0,513	0,470	0,432	0,389	0,352
Хлорбензол	0,791	0,696	0,627	0,580	0,528	0,481
Бромбензол	1,116	0,973	0,871	0,802	0,726	0,658
<i>o</i> -Фтортолуол	0,675	0,593	0,534	0,490	0,445	0,405
<i>m</i> -Фтортолуол	0,597	0,528	0,479	0,443	0,404	0,370
<i>n</i> -Фтортолуол	0,621	0,548	0,495	0,457	0,416	0,379
<i>o</i> -Хлортолуол	0,988	0,860	0,766	0,700	0,631	0,572
<i>m</i> -Хлортолуол	0,847	0,747	0,670	0,615	0,561	0,509
<i>n</i> -Хлортолуол	0,880	0,769	0,687	0,630	0,570	0,520
2,4-Дихлортолуол	1,403	1,191	1,045	0,940	0,839	0,754
2,6-Дихлортолуол	1,832	1,526	1,314	1,165	1,031	0,922

Полученные результаты были аппроксимированы полиномом третьей степени

$$\eta_T = b_0 + b_1(T - 273,15) + b_2(T - 273,15)^2 + b_3(T - 273,15)^3. \quad (8)$$

Коэффициенты  $b_i$  в формуле (8) представлены в таблице 9.

В таблице 10 приведено сравнение рассчитанных значений динамической вязкости по формуле (8) с литературными данными других авторов. Наблюдается хорошее согласие рассчитанных значений с литературными данными.

**Таблица 9.** Коэффициенты  $b_i$  в формуле (8)

**Table 9.** Coefficients  $b_i$  in formula (8)

Название вещества	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
Толуол	$7,93390 \cdot 10^{-1}$	$-1,36930 \cdot 10^{-2}$	$1,78579 \cdot 10^{-4}$	$-1,03538 \cdot 10^{-6}$
<i>o</i> -Ксилол	1,12316	$-2,14598 \cdot 10^{-2}$	$2,85694 \cdot 10^{-4}$	$-1,64415 \cdot 10^{-6}$
Этилбензол	$9,25747 \cdot 10^{-1}$	$-1,74071 \cdot 10^{-2}$	$2,47179 \cdot 10^{-4}$	$-1,50419 \cdot 10^{-6}$
Фторбензол	$7,65751 \cdot 10^{-1}$	$-1,23617 \cdot 10^{-2}$	$1,65309 \cdot 10^{-4}$	$-1,04932 \cdot 10^{-6}$
Хлорбензол	1,09733	$-2,03529 \cdot 10^{-2}$	$2,83754 \cdot 10^{-4}$	$-1,69958 \cdot 10^{-6}$
Бромбензол	1,57977	$-3,08698 \cdot 10^{-2}$	$4,33265 \cdot 10^{-4}$	$-2,57973 \cdot 10^{-6}$
<i>o</i> -Фтортолуол	$9,29981 \cdot 10^{-1}$	$-1,67103 \cdot 10^{-2}$	$2,22731 \cdot 10^{-4}$	$-1,30499 \cdot 10^{-6}$
<i>m</i> -Фтортолуол	$8,16067 \cdot 10^{-1}$	$-1,44940 \cdot 10^{-2}$	$1,99716 \cdot 10^{-4}$	$-1,19814 \cdot 10^{-6}$
<i>n</i> -Фтортолуол	$8,49695 \cdot 10^{-1}$	$-1,50388 \cdot 10^{-2}$	$2,02701 \cdot 10^{-4}$	$-1,19955 \cdot 10^{-6}$
<i>o</i> -Хлортолуол	1,39218	$-2,64424 \cdot 10^{-2}$	$3,51148 \cdot 10^{-4}$	$-2,01454 \cdot 10^{-6}$
<i>m</i> -Хлортолуол	1,16419	$-2,06563 \cdot 10^{-2}$	$2,70972 \cdot 10^{-4}$	$-1,56647 \cdot 10^{-6}$
<i>n</i> -Хлортолуол	1,22825	$-2,26533 \cdot 10^{-2}$	$2,95579 \cdot 10^{-4}$	$-1,66720 \cdot 10^{-6}$
2,4-Дихлортолуол	2,07268	$-4,40526 \cdot 10^{-2}$	$5,90904 \cdot 10^{-4}$	$-3,29952 \cdot 10^{-6}$
2,6-Дихлортолуол	2,80160	$-6,35002 \cdot 10^{-2}$	$8,37882 \cdot 10^{-4}$	$-4,49659 \cdot 10^{-6}$

**Таблица 10.** Сравнение рассчитанных и литературных данных по динамической вязкости

**Table 10.** Comparison of calculated and literature data on dynamic viscosity

Источник, год	Динамическая вязкость, мПа·с, при температуре, К										
	293,15	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15	323,15	328,15	333,15	338,15	343,15
Толуол											
[22], 2004	0,591	–	–	–	0,467	–	–	–	0,381	–	–
[8], 2009	–	0,550	–	0,498	–	–	–	–	–	–	–
[9], 2013	–	–	0,526	0,497	0,465	–	–	–	–	–	–
Расчет по (8)	0,583	0,546	0,515	0,489	0,465	0,444	0,426	0,408	0,391	0,374	0,355
<i>o</i> -Ксилол											
[22], 2004	0,807	–	–	–	0,623	–	–	–	0,500	–	–
[11], 2007	–	0,7610	0,7095	–	0,6261	–	0,5584	–	0,5020	–	0,4544
[8], 2009	–	0,759	–	0,658	–	–	–	–	–	–	–
[12], 2010	–	0,748	0,702	0,660	0,622	–	–	–	–	–	–
[9], 2013	–	–	0,708	0,662	0,621	–	–	–	–	–	–
Расчет по (8)	0,795	0,740	0,692	0,652	0,617	0,586	0,559	0,534	0,509	0,484	0,457

## Продолжение таблицы 10

## Continuation of table 10

Источник, год	Динамическая вязкость, мПа·с, при температуре, К										
	293,15	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15	323,15	328,15	333,15	338,15	343,15
Этилбензол											
[23], 2008	–	–	0,5770	–	0,5314	–	0,4841	–	–	–	–
[24], 2008	–	–	0,5986	0,5691	0,5372	0,5060	0,4805	0,4566	0,4371	–	–
[25], 2013	–	0,6378	0,6090	0,5682	0,5410	–	–	–	–	–	–
Расчет по (8)	0,664	0,622	0,585	0,555	0,529	0,506	0,485	0,466	0,446	0,426	0,402
Фторбензол											
[26], 2013	–	0,564	0,514	0,494	0,460	–	–	–	–	–	–
Расчет по (8)	0,576	0,544	0,515	0,491	0,469	0,449	0,430	0,411	0,393	0,373	0,351
Хлорбензол											
[8], 2009	–	0,755	–	0,679	–	–	–	–	–	–	–
[27], 2010	–	0,7568	0,7258	0,6770	0,6240	–	–	–	–	–	–
[14], 2013	–	0,767	0,716	0,660	–	–	–	–	–	–	–
[15], 2018	–	–	0,712	0,675	0,634	0,602	–	–	–	–	–
Расчет по (8)	0,790	0,739	0,696	0,660	0,628	0,601	0,577	0,554	0,531	0,507	0,480
Бромбензол											
[8], 2009	–	1,041	–	0,964	–	–	–	–	–	–	–
[14], 2013	–	1,065	1,005	0,972	–	–	–	–	–	–	–
[15], 2018	–	–	0,982	0,953	0,892	0,848	–	–	–	–	–
Расчет по (8)	1,115	1,039	0,974	0,919	0,873	0,833	0,797	0,763	0,730	0,695	0,657
<i>o</i> -Фтортолуол											
[22], 2004	0,588	–	–	–	0,541	–	–	–	0,443	–	–
Расчет по (8)	0,674	0,631	0,594	0,562	0,534	0,510	0,488	0,468	0,447	0,426	0,404
<i>m</i> -Фтортолуол											
[22], 2004	0,634	–	–	–	0,518	–	–	–	0,433	–	–
Расчет по (8)	0,596	0,560	0,529	0,502	0,479	0,459	0,441	0,424	0,407	0,389	0,369
<i>n</i> -Фтортолуол											
Расчет по (8)	0,620	0,582	0,549	0,520	0,496	0,474	0,455	0,436	0,418	0,399	0,379
<i>o</i> -Хлортолуол											
[22], 2004	0,989	–	–	–	0,773	–	–	–	0,634	–	–
[18], 2011	–	0,943	0,885	0,805	–	–	–	–	–	–	–
[10], 2014	–	–	0,885	–	0,741	–	–	–	–	–	–
[19], 2016	–	–	0,8860	0,8080	0,7280	0,6420	–	–	–	–	–
Расчет по (8)	0,988	0,919	0,861	0,810	0,767	0,730	0,696	0,665	0,635	0,604	0,571
<i>m</i> -Хлортолуол											
[18], 2011	–	0,798	0,746	0,705	–	–	–	–	–	–	–
[10], 2014	–	–	0,751	–	0,652	–	–	–	–	–	–
[19], 2016	–	–	0,7430	0,7010	0,6630	0,6240	–	–	–	–	–
Расчет по (8)	0,847	0,793	0,746	0,706	0,671	0,641	0,613	0,587	0,562	0,536	0,509
<i>n</i> -Хлортолуол											
[22], 2004	0,873	–	–	–	0,681	–	–	–	0,558	–	–
[18], 2011	–	0,828	0,784	0,730	–	–	–	–	–	–	–
[10], 2014	–	–	0,782	–	0,684	–	–	–	–	–	–
[19], 2016	–	–	0,7820	0,7280	0,6820	0,6320	–	–	–	–	–
Расчет по (8)	0,880	0,821	0,770	0,726	0,688	0,655	0,626	0,599	0,573	0,547	0,519

## Окончание таблицы 10.

## End of table 10.

Источник, год	Динамическая вязкость, мПа·с, при температуре, К											
	293,15	298,15	303,15	308,15	313,15	318,15	323,15	328,15	333,15	338,15	343,15	
2,4-Дихлортолуол												
[22], 2004	1,446	–	–	–	1,082	–	–	–	0,871	–	–	
Расчет по (8)	1,402	1,289	1,194	1,113	1,045	0,986	0,935	0,888	0,844	0,800	0,753	
2,6-Дихлортолуол												
Расчет по (8)	1,831	1,668	1,529	1,413	1,314	1,231	1,159	1,096	1,037	0,979	0,920	

## Выводы

В настоящем экспериментальном исследовании были определены плотность, коэффициент теплового расширения и динамическая вязкость жидких *o*-ксилола, этилбензола, фторбензола, хлорбензола, бромбензола, толуола, *o*-фтортолуола, *m*-фтортолуола, *n*-фтортолуола, *o*-хлортолуола, *m*-хлортолуола, *n*-хлортолуола, 2,4-дихлортолуола, 2,6-дихлортолуола при температурах от 293,15 до 343,15 К и атмосферном давлении 97,992 кПа. Мак-

симальная оценка погрешности измерений для плотности составила 0,13%, для динамической вязкости – 3,5%. Максимальная погрешность вычислений для коэффициента теплового расширения оценивается в 3%.

Результаты измерений были аппроксимированы полиномом третьей степени. Полученные формулы с небольшим набором коэффициентов позволяют вычислять плотность и вязкость указанных выше жидкостей при температурах из исследованного интервала и атмосферном давлении.

## Список литературы

1. Mohammadi M. D., Hamzehloo M. Experimental measurements of densities and viscosities of binary and ternary mixtures of benzene, cyclohexane, and *N,N*-dimethylacetamide at 298.15 K and 87 kPa // *Journal of Solution Chemistry*. 2022. Vol. 51. P. 768–784. <https://doi.org/10.1007/s10953-022-01171-1>
2. Hawary A. E., Meier K. Thermodynamic properties of liquid toluene and *n*-butane determined from speed of sound data // *International Journal of Thermophysics*. 2022. Vol. 43. Art. 71. <https://doi.org/10.1007/s10765-021-02958-y>
3. Densities and sound speeds of binary mixtures of cyclohexane + benzene (or toluene, or ethylbenzene or *o*-, *m*-, *p*-xylene) within the temperature range of 293.15–333.15 K and ambient pressure: experimental, correlation, and modeling study / A. Zeqiraj, A. Hernández, N. Sylá, R. Raçi, F. Aliaj // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2023. Vol. 68, is. 12. P. 3110–3125. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.3c00363>
4. A study on thermophysical properties of binary mixtures of *n*-hexane with benzene and some alkyl-substituted benzenes within temperature range (293.15–323.15) K: experimental and modeling approach / F. Aliaj, A. Hernández, R. Krasniqi, V. Elshani, N. Sylá, M. Misini, A. Zeqiraj // *Fluid Phase Equilibria*. 2024. Vol. 584. Art. 114129. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2024.114129>
5. Thol M., Lemmon E. W., Span R. Equation of state for benzene for temperatures from the melting line up to 725 K with pressures up to 500 MPa // *High Temperatures-High Pressures*. 2012. Vol. 41. P. 81–97.
6. Reference correlation of the viscosity of benzene from the triple point to 675 K and up to 300 MPa / S. Avgeri, M. J. Assael, M. L. Huber, R. A. Perkins // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 2014. Vol. 43, is. 3. P. 033103. <https://doi.org/10.1063/1.4892935>

7. Measuring and modelling experimental densities and ultrasonic velocities of aromatic and halogenated environmental pollutants / M. Iglesias, S. Mattedi, R. Gonzalez-Olmos, J. M. Goenaga, J. M. Resa // *Chemosphere*. 2007. Vol. 67, is. 2. P. 384–395. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.002>

8. Sastry N. V., Thakor R. R., Patel M. C. Excess molar volumes, viscosity deviations, excess entropic compressibilities and deviations in relative permittivities of (alkyl acetates (methyl, ethyl, butyl and isoamyl)+*n*-hexane, +benzene, +toluene, +(o-, m-, p-) xylenes, +(chloro-, bromo-, nitro-) benzene at temperatures from 298.15 to 313.15 K // *Journal of Molecular Liquids*. 2009. Vol. 144, is. 1–2. P. 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2008.09.006>

9. Volumetric, viscometric and excess properties of binary mixtures of 1-iodobutane with benzene, toluene, *o*-xylene, *m*-xylene, *p*-xylene, and mesitylene at temperatures from 303.15 to 313.15 K / S. Sharma, K. Thakkar, P. Patel, M. Makavana // *Advances in Physical Chemistry*. 2013. Vol. 2013. Art. ID 932103. <https://doi.org/10.1155/2013/932103>

10. Densities, viscosities and speeds of sound of binary mixtures of ethyl benzoate with toluene, and isomeric chlorotoluenes at different temperatures / D. Vijayalakshmi, C. N. Rao, M. Gowrisankar, K. Sivakumar, P. Venkateswarlu // *Journal of Molecular Liquids*. 2014. Vol. 197. P. 272–286. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2014.05.015>

11. Densities and viscosities of *N*-formylmorpholine (NFM) + *p*-xylene, + *o*-xylene, + *m*-xylene at different temperatures and atmospheric pressure / T. Yang, S. Xia, S. Song, X. Fu, P. Ma // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2007. Vol. 52, is. 5. P. 2062–2066. <https://doi.org/10.1021/je7002513>

12. Savale T. S., Shewale J. M., Nikam P. S. Densities and viscosities of binary mixtures of xylenes (*o*-, *m*-, and *p*-) with propan-1-ol at 298.15, 303.15, 308.15 and 313.15 K // *International Journal of Chemical Sciences*. 2010. Vol. 8, is. 2. P. 991–1006.

13. Atik Z., Lourddani K. Densities and volumetric properties of binary and ternary mixtures of diisopropyl ether, fluorobenzene,  $\alpha,\alpha,\alpha$ -trifluorotoluene, and ethanol at temperature 298.15 K and pressure 101 kPa // *Journal of Solution Chemistry*. 2006. Vol. 35, is. 10. P. 1453–1466. <https://doi.org/10.1007/s10953-006-9072-7>

14. Densities, viscosities, speeds of sound, and refractive indices of binary mixtures of 2-ethyl-1-hexanol with benzene and halobenzenes / S. C. Bhatia, J. Sangwan, R. Rani, V. Kiran // *International Journal of Thermophysics*. 2013. Vol. 34. P. 2076–2088. <https://doi.org/10.1007/s10765-013-1526-8>

15. Molecular interactions in binary mixtures of 2-chloroaniline and monosubstituted benzene derivatives at various temperatures / D. Ubagaramary, I. V. M. V. Enoch, M. Gowrisankar, S. Mullaianathan // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2018. Vol. 92, is. 13. P. 2665–2678. <https://doi.org/10.1134/S0036024418130319>

16. Schilling G., Kleinrahm R., Wagner W. Measurement and correlation of the ( $p$ ,  $\rho$ ,  $T$ ) relation of liquid *n*-heptane, *n*-nonane, 2,4-dichlorotoluene, and bromobenzene in the temperature range from (233.15 to 473.15) K at pressures up to 30 MPa for use as density reference liquids // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2008. Vol. 40, is. 7. P. 1095–1105. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2008.02.020>

17. Sassi M., Atik Z. Excess molar volumes of binary mixtures of 2,2,2-trifluoroethanol with water, or acetone, or 1,4-difluorobenzene, or 4-fluorotoluene, or  $\alpha,\alpha,\alpha$ -trifluorotoluene or 1-alcohols at a temperature of 298.15 K and pressure of 101 kPa // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2003. Vol. 35, is. 7. P. 1161–1169. [https://doi.org/10.1016/S0021-9614\(03\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0021-9614(03)00079-X)

18. Densities, viscosities, speeds of sound, and refractive indices of binary mixtures of 1-decanol with isomeric chlorotoluenes / S. C. Bhatia, R. Rani, J. Sangwan, R. Bhatia // *International Journal of Thermophysics*. 2011. Vol. 32. P. 1163–1174. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-0995-x>

19. Densities, viscosities and speeds of sound of binary mixtures of 2-chloroaniline with *o*-chlorotoluene, *m*-chlorotoluene and *p*-chlorotoluene at different temperatures / G. P. Chand, M. G. Sankar,

D. Ramachandran, C. Rambabu // *Journal of Solution Chemistry*. 2016. Vol. 45, is. 2. P. 153–187. <https://doi.org/10.1007/s10953-016-0439-0>

20. Бобылёв В. Н. Физические свойства наиболее известных химических веществ. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2003. 24 с.

21. Thermodynamic properties of non-electrolyte solutions / K. Sreenivasulu, V. Govinda, P. Venkateswarlu, K. Sivakumar // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2014. Vol. 115, is. 2. P. 1805–1811. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3395-6>

22. Мельников Г. А., Шахов А. В. Акустические, структурные и релаксационные свойства галогенозамещенных толуола // *Ультразвук и термодинамические свойства вещества*. 2004. № 30/31. С. 98–110.

23. Baskaran R., Kubendran T. R. Thermo physical properties of 4-hydroxy 4-methyl pentanone with nitrobenzene or ethyl benzene at temperatures of (303.15, 313.15, and 323.15) K and a pressure of 0.1 MPa // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2008. Vol. 53, is. 8. P. 1956–1961. <https://doi.org/10.1021/je8002699>

24. Densities and viscosities of binary mixtures of vitamin K<sub>3</sub> with benzene, toluene, ethylbenzene, *o*-xylene, *m*-xylene, and *p*-xylene from (303.15 to 333.15) K / C.-Y. Song, H.-Z. Shen, J.-H. Zhao, L.-C. Wang, Fu-An Wang // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2008. Vol. 53, is. 5. P. 1110–1115. <https://doi.org/10.1021/je7006549>

25. Barega E. W., Zondervan E., de Haan A. B. Experimental density, viscosity, interfacial tension and water solubility of ethyl benzene- $\alpha$ -methyl benzyl alcohol–water system // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2013. Vol. 63. P. 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2013.03.023>

26. Wohlfarth C. Viscosity of the binary liquid mixture of fluorobenzene and hexyl acetate // *Viscosity of Pure Organic Liquids and Binary Liquid Mixtures* / ed. M. D. Lechner. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2017. 1794 p. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-49218-5\\_1591](https://doi.org/10.1007/978-3-662-49218-5_1591)

27. Thermodynamic properties of the binary mixtures of 1,2-dichloroethane with chlorobenzene and bromobenzene from (298.15 to 313.15) K / B. Ni, L. Su, H. Wang, H. Qiu // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2010. Vol. 55, is. 10. P. 4541–4545. <https://doi.org/10.1021/je100552a>

## References

1. Mohammadi M.D., Hamzehloo M. Experimental measurements of densities and viscosities of binary and ternary mixtures of benzene, cyclohexane, and *N,N*-dimethylacetamide at 298.15 K and 87 kPa. *Journal of Solution Chemistry*. 2022;51:768–784. <https://doi.org/10.1007/s10953-022-01171-1>

2. Hawary A.E., Meier K. Thermodynamic properties of liquid toluene and *n*-butane determined from speed of sound data. *International Journal of Thermophysics*. 2022;43. <https://doi.org/10.1007/s10765-021-02958-y>

3. Zeqiraj A., Hernández A., Sylva N., Raçi R., Aliaj F. Densities and sound speeds of binary mixtures of cyclohexane + benzene (or toluene, or ethylbenzene or *o*-, *m*-, *p*-xylene) within the temperature range of 293.15–333.15 K and ambient pressure: experimental, correlation, and modeling study. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2023;68(12):3110–3125. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.3c00363>

4. Aliaj F., Hernández A., Krasniqi R., Elshani V., Sylva N., Misini M., Zeqiraj A. A study on thermophysical properties of binary mixtures of *n*-hexane with benzene and some alkyl-substituted benzenes within temperature range (293.15–323.15) K: experimental and modeling approach. *Fluid Phase Equilibria*. 2024;584:114129. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2024.114129>

5. Thol M., Lemmon E. W., Span R. Equation of state for benzene for temperatures from the melting line up to 725 K with pressures up to 500 MPa. *High Temperatures-High Pressures*. 2012;41:81–97.

6. Avgeri S., Assael M. J., Huber M. L., Perkins R. A. Reference correlation of the viscosity of benzene from the triple point to 675 K and up to 300 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 2014;43(3):033103. <https://doi.org/10.1063/1.4892935>
7. Iglesias M., Mattedi S., Gonzalez-Olmos R., Goenaga J. M., Resa J. M. Measuring and modeling experimental densities and ultrasonic velocities of aromatic and halogenated environmental pollutants. *Chemosphere*. 2007;67(2):384–395. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.002>
8. Sastry N.V., Thakor R.R., Patel M.C. Excess molar volumes, viscosity deviations, excess isentropic compressibilities and deviations in relative permittivities of (alkyl acetates (methyl, ethyl, butyl and isoamyl) + *n*-hexane, + benzene, + toluene, + (*o*-, *m*-, *p*-) xylenes, + (chloro-, bromo-, nitro-) benzene at temperatures from 298.15 to 313.15 K. *Journal of Molecular Liquids*. 2009;144(1–2):13–22. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2008.09.006>
9. Sharma S., Thakkar K., Patel P., Makavana M. Volumetric, viscometric and excess properties of binary mixtures of 1-iodobutane with benzene, toluene, *o*-xylene, *m*-xylene, *p*-xylene, and mesitylene at temperatures from 303.15 to 313.15 K. *Advances in Physical Chemistry*. 2013;2013:932103. <https://doi.org/10.1155/2013/932103>
10. Vijayalakshmi D., Rao C. N., Gowrisankar M., Sivakumar K., Venkateswarlu P. Densities, viscosities and speeds of sound of binary mixtures of ethyl benzoate with toluene, and isomeric chlorotoluenes at different temperatures. *Journal of Molecular Liquids*. 2014;197:272–286. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2014.05.015>
11. Yang T., Xia S., Song S., Fu X., Ma P. Densities and viscosities of *N*-formylmorpholine (NFM) + *p*-xylene, + *o*-xylene, + *m*-xylene at different temperatures and atmospheric pressure. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2007;52(5):2062–2066. <https://doi.org/10.1021/jc7002513>
12. Savale T. S., Shewale J. M., Nikam P. S. Densities and viscosities of binary mixtures of xylenes (*o*-, *m*-, and *p*-) with propan-1-ol at 298.15, 303.15, 308.15 and 313.15 K. *International Journal of Chemical Sciences*. 2010;8(2):991–1006.
13. Atik Z., Lourddani K. Densities and volumetric properties of binary and ternary mixtures of diisopropyl ether, fluorobenzene,  $\alpha,\alpha,\alpha$ -trifluorotoluene, and ethanol at temperature 298.15 K and pressure 101 kPa. *Journal of Solution Chemistry*. 2006;35(10):1453–1466. <https://doi.org/10.1007/s10953-006-9072-7>
14. Bhatia S. C., Sangwan J., Rani R., Kiran V. Densities, viscosities, speeds of sound, and refractive indices of binary mixtures of 2-ethyl-1-hexanol with benzene and halobenzenes. *International Journal of Thermophysics*. 2013;34:2076–2088. <https://doi.org/10.1007/s10765-013-1526-8>
15. Ubagaramary D., Enoch I. V. M. V., Gowrisankar M., Mullainathan S. Molecular interactions in binary mixtures of 2-chloroaniline and monosubstituted benzene derivatives at various temperatures. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2018;92(13):2665–2678. <https://doi.org/10.1134/S0036024418130319>
16. Schilling G., Kleinrahm R., Wagner W. Measurement and correlation of the ( $p$ ,  $\rho$ ,  $T$ ) relation of liquid *n*-heptane, *n*-nonane, 2,4-dichlorotoluene, and bromobenzene in the temperature range from (233.15 to 473.15) K at pressures up to 30 MPa for use as density reference liquids. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2008;40(7):1095–1105. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2008.02.020>
17. Sassi M., Atik Z. Excess molar volumes of binary mixtures of 2,2,2-trifluoroethanol with water, or acetone, or 1,4-difluorobenzene, or 4-fluorotoluene, or  $\alpha,\alpha,\alpha$ -trifluorotoluene or 1-alcohols at a temperature of 298.15 K and pressure of 101 kPa. *The Journal of Chemical Thermodynamic*. 2003;35(7):1161–1169. [https://doi.org/10.1016/S0021-9614\(03\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0021-9614(03)00079-X)
18. Bhatia S. C., Rani R., Sangwan J., Bhatia R. Densities, viscosities, speeds of sound, and refractive indices of binary mixtures of 1-decanol with isomeric chlorotoluenes. *International Journal of Thermophysics*. 2011;32:1163–1174. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-0995-x>
19. Chand G. P., Sankar M. G., Ramachandran D., Rambabu C. Densities, viscosities and speeds of sound of binary mixtures of 2-chloroaniline with *o*-chlorotoluene, *m*-chlorotoluene and



*p*-chlorotoluene at different temperatures. *Journal of Solution Chemistry*. 2016;45(2):153–187. <https://doi.org/10.1007/s10953-016-0439-0>

20. Bobylev V. N. Physical properties of the most famous chemical substances. Moscow: RKhTU im. D. I. Mendeleeva; 2003. 24 p. (In Russ.)

21. Sreenivasulu K., Govinda V., Venkateswarlu P., Sivakumar K. Thermodynamic properties of non-electrolyte solutions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2014;115(2):1805–1811. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3395-6>

22. Melnikov G.A., Shakhov A.V. Acoustic, structural and relaxation properties of halogen-substituted toluene. *Ul'trazvuk i termodinamicheskiye svoystva veshchestva = Ultrasound and thermodynamic properties of matter*. 2004;(30/31):98–110. (In Russ.)

23. Baskaran R., Kubendran T.R. Thermo physical properties of 4-hydroxy 4-methyl pentanone with nitrobenzene or ethyl benzene at temperatures of (303.15, 313.15, and 323.15) K and a pressure of 0.1 MPa. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2008;53(8):1956–1961. <https://doi.org/10.1021/je8002699>

24. Song C.-Y., Shen H.-Z., Zhao J.-H., Wang L.-C., Wang Fu-An. Densities and viscosities of binary mixtures of vitamin K<sub>3</sub> with benzene, toluene, ethylbenzene, *o*-xylene, *m*-xylene, and *p*-xylene from (303.15 to 333.15) K. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2008;53(5):1110–1115. <https://doi.org/10.1021/je7006549>

25. Barga E. W., Zondervan E., de Haan A. B. Experimental density, viscosity, interfacial tension and water solubility of ethyl benzene- $\alpha$ -methyl benzyl alcohol–water system. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2013;63:31–37. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2013.03.023>

26. Wohlfarth C. Viscosity of the binary liquid mixture of fluorobenzene and hexyl acetate. In: Lechner M. D. (ed.) *Viscosity of Pure Organic Liquids and Binary Liquid Mixtures*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2017. 1794 P. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-49218-5\\_1591](https://doi.org/10.1007/978-3-662-49218-5_1591).

27. Ni B., Su L., Wang H., Qiu H. Thermodynamic properties of the binary mixtures of 1,2-dichloroethane with chlorobenzene and bromobenzene from (298.15 to 313.15) K. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2010;55(10):4541–4545. <https://doi.org/10.1021/je100552a>

---

## Информация об авторах / Information about the Authors

**Громков Андрей Сергеевич**, аспирант кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [andrei\\_gromkov@mail.ru](mailto:andrei_gromkov@mail.ru), ORCID: 0000-0001-6710-9949

**Andrey S. Gromkov**, Post-Graduate Student of the Departments of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [andrei\\_gromkov@mail.ru](mailto:andrei_gromkov@mail.ru), ORCID: 0000-0001-6710-9949

**Игнатенко Николай Михайлович**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [inmkstu@bk.ru](mailto:inmkstu@bk.ru), ORCID: 0000-0002-2807-9887

**Nikolay M. Ignatenko**, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor of the Departments of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [inmkstu@bk.ru](mailto:inmkstu@bk.ru), ORCID: 0000-0002-2807-9887

**Мельников Геннадий Александрович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: melnikovga@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9017-6285

**Сучилкин Вадим Викторович**, старший преподаватель кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: svadim07@rambler.ru

**Манжос Ольга Александровна**, аспирант кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: olga.apalkova@list.ru

**Gennady A. Melnikov**, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Departments of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: melnikovga@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9017-6285

**Vadim V. Suchilkin**, Senior lecturer of the Departments of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: svadim07@rambler.ru

**Olga A. Manzhos**, Post-Graduate Student of the Departments of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: olga.apalkova@list.ru