

**З. И. Зарипов, С. В. Мазанов, А. У. Аетов,
Ю. А. Шаповалов**

ИЗОБАРНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ РЫБЬЕГО ЖИРА ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ДО 473,15 К И ДАВЛЕНИЙ ДО 39,2 МПА

Ключевые слова: рыбий жир, теплоемкость, высокие температуры, высокое давление, биодизельное топливо.

Настоящее исследование направлено на изучение теплоемкости рыбьего жира, как маслянистой компоненты для получения биодизельного топлива. Одним из наиболее перспективных возобновляемых источников сырья для получения биодизельного топлива являются микроводоросли. По энергетическому выходу микроводоросли значительно превосходят пальмовое и рапсовое масло, обычно применяемое для производства биодизеля. Научная значимость работы заключается в пополнении базы данных по изобарной теплоемкости исследуемых веществ. Практическая значимость состоит в том, что полученные данные будут необходимы на этапах моделирования, оптимизации и масштабирования технологии производства биодизельного топлива из рыбьего жира. Различия в составе рыбьего жира для разных пород рыб создают проблему недостаточной исследованности их свойств. Изучение теплоемкости стало основной целью данной работы. Для измерения изобарной теплоемкости рыбьего жира использовался сканирующий калориметр (ИТ-с-400) с системой автоматического сбора данных. В статье представлены новые результаты исследования изобарной теплоемкости рыбьего жира при высоких температурах и давлениях. Измерения проводились в температурном диапазоне от 298,15 до 473,15 К и при давлениях до 39,2 МПа. Расширенная неопределенность измерений теплоемкости составляет 2,4 %, давления — 0,05 %, а температуры — 15 мК при уровне достоверности 95 % и коэффициенте охвата $k = 2$. Проведено сравнение полученных и литературных данных в исследованной области параметров состояния. Сравнение полученных данных с приведенным расчетом по корреляционному уравнению при температуре 293 К и атмосферном давлении показало хорошее согласие. К примеру, удельные теплоемкости сырого рыбьего жира отличаются от данных по уравнению на 8 %, обессмоленного на -6,7 %, нейтрализованного на -7,27 %, отбеленного на -4 % и дезодорированного соматического жира на 0,36 % соответственно.

**Z. I. Zaripov, S. V. Mazanov, A. U. Aetov,
Yu. A. Shapovalov**

ISOBARIC HEAT CAPACITY OF FISH OIL AT TEMPERATURES UP TO 473,15 K AND PRESSURES UP TO 39,2 MPa

Keywords: fish oil, heat capacity, high temperatures, high pressure, biodiesel fuel.

The present study is aimed at studying the heat capacity of fish oil as an oil component for obtaining biodiesel fuel. One of the most promising renewable sources of raw materials for obtaining biodiesel fuel are microalgae. In terms of energy yield, microalgae significantly exceed palm and rapeseed oil, which are usually used to produce biodiesel. The scientific significance of the work lies in replenishing the database on the isobaric heat capacity of the substances under study. The practical significance is that the obtained data will be needed at the stages of modeling, optimization and scaling of the technology for producing biodiesel fuel from fish oil. Differences in the composition of fish oil for different fish species create the problem of insufficient study of their properties. The study of heat capacity was the main goal of this work. A scanning calorimeter (IT-s-400) with an automatic data collection system was used to measure the isobaric heat capacity of fish oil. The article presents new results of a study of the isobaric heat capacity of fish oil at high temperatures and pressures. The measurements were carried out in the temperature range from 298.15 to 473.15 K and at pressures up to 39.2 MPa. The expanded uncertainty of heat capacity measurements is 2.4%, pressure — 0.05%, and temperature — 15 mK at a confidence level of 95% and a coverage factor of $k = 2$. A comparison of the obtained and literature data in the studied area of state parameters was carried out. A comparison of the obtained data with the presented calculation according to the correlation equation at a temperature of 293 K and atmospheric pressure showed good agreement. For example, the specific heat capacities of raw fish oil differ from the data according to the equation by 8%, deresined by -6.7%, neutralized by -7.27%, bleached by -4% and deodorized somatic fat by 0.36%, respectively.

Введение

Экспоненциальный рост потребления углеводородного топлива на фоне стремительно истощающихся запасов, а также серьезные экологические последствия его эксплуатации вызывают настоятельную необходимость поиска и освоения новых возобновляемых источников энергии, основанных на биологических материалах [1-4]. К числу таких альтернативных источников относится биодизельное топливо [5, 6], которое в большинстве случаев получают

через процесс переэтерификации растительных масел или животных жиров, включая рыбий жир, в присутствии спиртов, в частности метанола или этанола.

Одним из наиболее многообещающих компонентов для производства биодизельного топлива являются микроводоросли. В сравнении с пальмовым и рапсовым маслами, микроводоросли демонстрируют значительно более высокий энергетический выход. Использование микроводорослей не только способствует решению экономических и энергетических проблем, но также позволяет решить важные экологические задачи, так как они служат источником по-

лезных веществ, таких как кислоты Омега-3 (эйкозапентаеновая кислота) и Омега-6 (докозагексаеновая кислота), а также сквален. Несмотря на очевидный потенциал производства биодизеля из микроводорослей, эффективные и экономически выгодные технологии превращения этих организмов в топливо еще не разработаны.

Для извлечения ценных компонентов из микроводорослей применяются разнообразные методы экстракции, причем наибольшее содержание Омега-3 и Омега-6 обычно обнаруживается в рыбьем жире. В настоящее время самым передовым методом их получения считается сверхкритическая флюидная экстракция с использованием диоксида углерода в качестве экстрагента. Этот метод обеспечивает I-II тип фазового поведения [7, 8] и осуществляется при температурах свыше 323 К и давлениях в диапазоне 25–35 МПа. Однако диоксид углерода не используется в качестве среды для реакции переэтерификации, что обусловлено его низкой смешиваемостью с исходным сырьем, являющимся частью процесса получения биодизельного топлива [9-12].

Различия в составах масличного сырья, зависящие от регионального происхождения, а также вариативность состава рыбьего жира в зависимости от видов рыб поднимают вопросы о недостаточной изученности их термодинамических свойств, таких как теплоемкость. Это и стало основной целью данного исследования.

Научная ценность работы заключается в расширении базы данных по изобарной теплоемкости исследуемых субстанций. Практическая значимость состоит в том, что полученные результаты станут необходимыми для этапов моделирования, оптимизации и масштабирования технологий получения биодизельного топлива из рыбьего жира.

Анализ литературы [13, 14] показал, что объем доступных данных о свойствах рыбьего жира ограничен. Информация о свойствах различных образцов жира от различных производителей включает данные о составе, температурах плавления, удельной теплоемкости и энтальпии при атмосферном давлении. Например, исследования S. Sathivel и его коллег [13] описали температуры плавления, энтальпии и удельную теплоемкость висцерального жира сома на разных стадиях очистки, с применением дифференциального сканирующего калориметра DSC-2920 (TA Instruments, New Castle, USA). Установлено, что теплоемкость и энтальпия плавления как сырого, так и обработанного рыбьего жира зависит от применяемой обработки. В своих исследованиях S. Sathivel и др. [14] также изучали термические и гидродинамические свойства нерафинированного масла из голов нерки и горбуши, определяя температуры деградации и плавления, а также теплоемкость. Работы продемонстрировали, что на теплоемкость влияют состав, сорт рыбы и степень обработки сырья. В другом исследовании [15] были описаны теплопроводные свойства образцов рыбьего жира (OMEGA-3 “950”) при давлениях выше атмосферного. Существующие теоретические методы определения теплоемкости, основанные на принципах соответствующих состоя-

ний [16-18] и групповых составляющих [19-21], могут предсказать значения теплоемкости для отдельных жирных кислот и их смесей, но не учитывают влияние давления.

Основная задача данной работы заключается в разработке достоверных данных о теплоемкости при высоких давлениях (до 39,2 МПа) и температурах, достигающих 473,15 К (от температуры окружающей среды до указанного значения) для образца рыбьего жира. Эти данные будут необходимы для различных термодинамических расчетов и анализа.

Материалы и методы

Образец рыбьего жира OMEGA-3 “950” был предоставлен компанией SOLGAR INC (USA) ($n_D^{25} = 1,4792$, $\rho_4^{25} = 904,8$ кг/м³). Согласно данным производителя образец получен методом молекулярной дистилляции рыбьего жира из глубоководных рыб холодных морей (анчоус, макрель, сардина, сельдь). Образец был использован без дальнейшей очистки. Описание образца приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Информация о чистоте образца

Table 1 – Sample purity information

Химическое название	Поставщик	Начальная чистота %	Конечная чистота %
OMEGA-3 “950” (эйкозапентаеновая кислота (ЭПК) 53,05 % (масс.), докозагексаеновая кислота (ДГК) 39,79 % (масс.), вспомогательные вещества) 7,16 % (масс.)	SOLGAR INC (USA)	99,0	99,0

Аппаратура и экспериментальные методики были тщательно изложены в ранее опубликованных работах [22, 23]. Изобарная теплоемкость рыбьего жира измерялась с использованием сканирующего калориметра (ИТ-с-400), оснащенного системой автоматизированного сбора данных.

С целью проверки надежности и точности полученных данных, а также для оценки функциональности экспериментальной установки, мы осуществили измерения теплоемкости воды. Для этого выбора были использованы достоверные и хорошо документированные экспериментальные данные. Подробности этих измерений можно найти в одной из наших недавних публикаций [23]. В ходе испытаний наблюдались отклонения в пределах экспериментальной неопределенности методики: теплоемкость воды показала средние абсолютные относительные отклонения (AAD = 0,25 %) в температурном диапазоне от 333 до 453 К при давлении 24,5 МПа, что согласуется

с данными источника [24]. Небольшие зафиксированные отклонения соответствуют экспериментальным неопределенностям применяемого метода. Сопоставление полученных измерений с эталонными данными по теплоемкости подтверждает точность и надежность экспериментальной установки, применяемой для измерения теплоемкости рыбьего жира OMEGA-3 "950".

Результаты и обсуждение

Измеренные значения изобарной теплоемкости рыбьего жира в зависимости от температуры и давления в диапазоне температур от 298,15 до 473,15 К и при давлениях от 0,098 до 39,2 МПа представлены на рисунках 1 и 2.

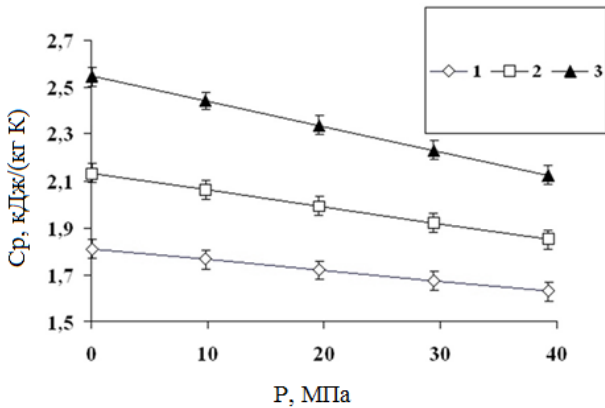


Рис. 1 – Зависимость изобарной теплоемкости рыбьего жира от давления P, МПа: 1 – 298,15 К; 2 – 373,15 К; 3 – 473,15 К

Fig. 1 – Dependence of isobaric heat capacity of fish oil on pressure P, MPa: 1 - 298,15 K; 2 - 373,15 K; 3 - 473,15 K

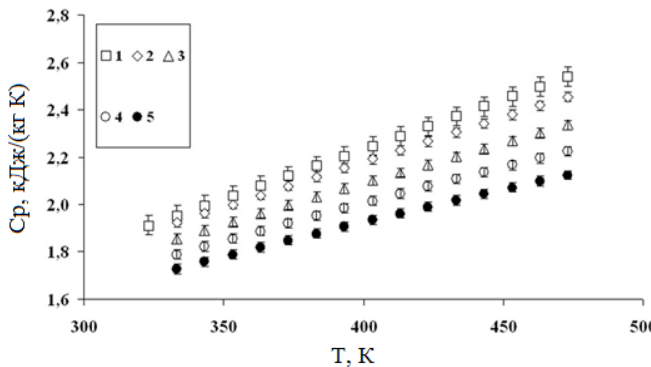


Рис. 2 – Зависимость изобарной теплоемкости рыбьего жира от температуры при давлениях P, МПа: 1 – 0,098; 2 – 9,8; 3 – 19,6; 4 – 29,4; 5 – 39,2

Fig. 2 – Dependence of isobaric heat capacity of fish oil on temperature at pressures P, MPa: 1 - 0,098; 2 - 9,8; 3 - 19,6; 4 - 29,4; 5 - 39,2

Экспериментальные данные изобарной теплоемкости рыбьего жира от температуры и давления аппроксимированы уравнением вида:

$$C_p(P, T) = a_0 + a_1T + a_2P + a_3PT + a_4T^2 + a_5P^2, (1)$$

где $C_p(P, T)$ - изобарная теплоемкость при заданных P и T, кДж/(кг·К); a_i ($i = 0,5$) - подгоночные параметры. Оптимальные значения полученных подгоночных параметров вместе со статистикой отклонений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициенты a_j полинома (1) для расчета теплоемкости рыбьего жира в диапазоне температур от 298,15 до 473,15 К и давлений от 0,098 МПа до 39,2 МПа

Table 2 – Coefficients a_j of polynomial (1) for calculation of fish oil heat capacity in the range of temperatures from 298.15 to 473.15 K pressures from 0.098 MPa to 39.2 MPa

Коэффициенты a_j полинома	
a_0 , кДж/(кг·К)	0,7717
a_1 , кДж/(кг·К ²)	$3,313 \cdot 10^{-3}$
a_2 , кДж/(кг·К·МПа)	$-3,718 \cdot 10^{-4}$
a_3 , кДж/(кг·К ² ·МПа)	$-1,74 \cdot 10^{-5}$
a_4 , кДж/(кг·К ³)	$1,095 \cdot 10^{-6}$
a_5 , кДж/(кг·К·МПа ²)	–
St. Dev, %	0,28
AAD%	0,22

Как видно из таблицы 2, корреляционное уравнение (1) представляет текущие данные по теплоемкости рыбьего жира в пределах их экспериментальной неопределенности (AAD = 0,22 %), включая значения C_p высокого давления. При атмосферном давлении отклонения между рассчитанными по корреляционному уравнению (1) и текущие измеренные данные $C_p(P, T)$ находятся в пределах AAD = 0,22 % (среднеквадратичное отклонение St. Dev = 0,28 % и максимальное отклонение $MAAD = \max \left[\frac{|C_{p_i \text{экс}} - C_{p_i \text{расч}}|}{C_{p_i \text{экс}}} \right] = 0,39 \%$).

Сравнение с литературными и расчетными данными

Корреляционное уравнение (1) было использовано для сравнения настоящих данных по теплоемкости для рыбьего жира с опубликованными экспериментальными [13] и с расчетом по методу соответственных состояний [16-18] и групповых составляющих [19-21]. При расчетах по методам [16-21] необходимы знания состава и критических параметров вещества.

Исследованный образец рыбьего жира представляет смесь двух ненасыщенных жирных кислот (ЭПК+ ДГК) в соотношении 0,609:0,391. Расчеты теплоемкости по методам [16, 18-21] проведены для смесей этих кислот.

Для расчета теплоемкости C_p рыбьего жира при атмосферном давлении рассмотрены: - уравнение, предложенное Бонди [16]:

$$\frac{c_p - c_p^0}{R} = 2,56 + 0,436(1 - \tau)^{-1} + \omega \left[2,91 + 4,28(1 - \tau)^{1/3} / \tau + 0,296(1 - \tau)^{-1} \right]; \quad (2)$$

- уравнение, предложенное Филипповым [18]:

$$C_p - C_p^0 = 20 + 3,9 \frac{\tau^2}{1 - \tau} + \left(74 - \frac{24,4}{\tau} + \frac{12,5}{\tau^2} \right) \cdot \lg(4/A), \quad (3)$$

где значения фактора ацентричности Питцера и критическая температура рассчитаны по правилу аддитивности по групповому составу [16]; критерий Филиппова A рассчитан на основании инкрементов, приведенных в [18];

- уравнение, предложенное Ruzicka [19]:

$$\frac{C}{R} = \sum_{i=1}^k n_i \cdot \Delta C_i, \quad (4)$$

где n_i – число групповых связей типа i , ΔC_i – теплоемкость, приходящаяся на долю групповой связи типа i ; k – общее число групповых связей в молекуле; значения групповой составляющей теплоемкости определяется по формуле: $\Delta C_{i,k} = a + b(T/100) + d(T/100)^2$, где a, b, d – постоянные температурной зависимости;

- уравнение, предложенное Ceriani [20]:

$$c_{p_i}^l = \sum_k N_k \cdot (A_k + B_k \cdot T), \quad (5)$$

где N_k – число групп k в молекуле, A_k и B_k – параметры, полученные в результате регрессии экспериментальных данных;

- уравнение, предложенное Zhu [21]

$$C_p = 1.794 + 2.64 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1.04 \cdot 10^{-2} \cdot C - 6.6 \cdot 10^{-2} \cdot U, \quad (6)$$

где T – температура, °C, C – среднее число атомов углерода всех жирных кислот, U – среднее число двойных связей для всех жирных кислот.

Сравнение данных из [13] с расчетом по корреляционному уравнению (1) экстраполированному к температуре 293 К и атмосферному давлению показало следующее. К примеру, удельные теплоемкости сырого рыбьего жира отличаются от данных по уравнению (1) на 8 %, обессмоленного на -6,7 %, нейтрализованного на -7,27 %, отбеленного на -4 % и дезодорированного соматического жира на 0,36 % соответственно. При этом теплоемкость жира варьировалась в зависимости от типа обработки от 1,69 до 1,97 кДж/(кг·К). Значительные отклонения теплоемкости данных [13] вызваны наличием в них примесей, такими как фосфолипиды, свободные жирные кислоты, альдегиды, кетоны, вода и пигменты. Теплоемкость дезодорированного соматического жира ($C_p=1,837$ кДж/(кг·К) по данным [13] (содержание ненасыщенных жирных кислот около 68 %) близка к расчетной теплоемкости уравнения (1).

На рис. 3 приведены расчетные по [16, 18-21] и экспериментальные данные теплоемкости исследо-

ванного образца рыбьего жира при атмосферном давлении. Как видно из рис. 3 расчетные данные C_p по методике [18] систематически выше текущих измерений в среднем на 6,36 %. На рисунке 7 показаны процентные отклонения (график отклонения) теплоемкости при атмосферном давлении между уравнением корреляции (1), а также настоящими и другими расчетными данными [18-21]. Статистика отклонений сведена в таблицу 3.

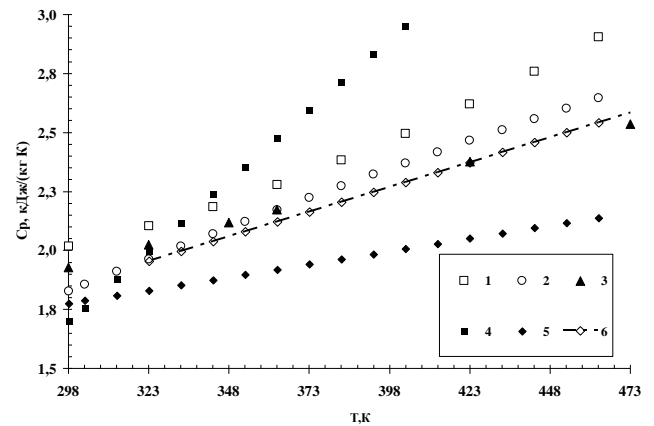


Рис. 3 – Теплоемкость рыбьего жира при атмосферном давлении: пунктир – расчет по уравнению (1): 1– Ruzicka [19]; 2 – Bondi [16]; 3 – Филиппов [18]; 4 – R. Ceriani [20]; 5 – Xiaoyi Zhu [21]; 6 – настоящая работа

Fig. 3 – Heat capacity of fish oil at atmospheric pressure: dotted line - calculation according to equation (1): 1- Ruzicka [19]; 2 - Bondi [16]; 3 -Philippov [18]; 4 - R. Ceriani [20]; 5 - Xiaoyi Zhu [21]; 6 - present work

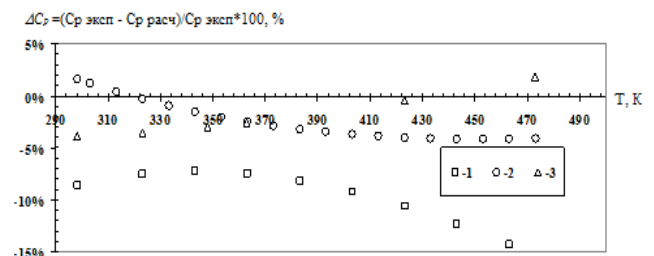


Рис. 4 – Отклонения ΔC_p всех доступных данных изобарной теплоемкости рыбьего жира от уравнения (1) в зависимости от температуры при атмосферном давлении: 1 – Ruzicka [19]; 2 – Bondi [16]; 3 – Филиппов [18]

Fig. 4 – ΔC_p deviations of all available data of isobaric heat capacity of fish oil from equation (1) as a function of temperature at atmospheric pressure: 1 - Ruzicka [19]; 2 - Bondi [16]; 3 - Filippov [18]

Исходя из данных (рис. 4, табл. 3) можно заключить, что, к примеру, расчеты по методу, предложенным Ruzicka [19], продемонстрировали отклонения от уравнения (2) до -15,15 %. Столь существенные различия связаны с величиной групповой составляющей двойных связей. Расчет по методу, предложенным Филипповым [18] показал отклонения с ростом температуры в пределах от -3,86 до +1,87 %. Расчет

по Bondi [16] продемонстрировал отклонения от 1,6 до 4,2 %. Значительные отклонения расчетных значений Ceriani [20] до 46 % и Zhu [21] до 16,5 % связаны с ограниченностью экспериментальных данных, использованных при подборе постоянных.

Таблица 3 – Стандартные отклонения (St.Err.), средние абсолютные относительные отклонения (AAD) и максимальные относительные отклонения (MAAD) по отношению к уравнению (1) при атмосферном давлении

Table 3 – Standard deviations (St.Err.), average absolute relative deviations (AAD) and maximum relative deviations (MAAD) versus equation (1) at atmospheric pressure

Авторы	St. Err, %	AAD, %	MADD, %
Bondi [16]	1,94	6,36	4,17
Филиппов [18]	2,22	2,6	3,86
Ruzicka [19]	16,49	23,1	15,15
Ceriani [20]	33,13	23,1	46,55
Xiaoyi Zhu [21]	13,14	24,3	16,41
Настоящая работа	0,15	0,11	0,19

Для оценки влияния давления на теплоемкость рыбьего жира и сравнения с экспериментальными данными, использовано расчетное уравнение, предложенное Филипповым [18]:

$$\frac{\Delta C_p}{R} = 7,77 - 10,33 \cdot \lg(A) + \frac{37(\chi - 0,17)}{1 - 1,45 \cdot \chi}, \quad (7)$$

где $\Delta C_p = C_p - C_p^0$; $\chi = \phi - 0,31\tau$; $\tau = T/T_{кр}$; $\phi = V/V_{кр}$; C_p^0 – идеально-газовая теплоемкость, рассчитанная по методу Rihany and Doraisamy [17]; критерий Филиппова A рассчитан на основании инкрементов, приведенных в [18].

Критические параметры были определены на основе групповых составляющих с учетом их структурного состава, как указано в работе [16].

Визуализация результатов сравнения теплоемкости под давлением представлена на рисунке 5. Средняя ошибка расчета теплоемкости рыбьего жира, основанная на уравнении (7) при давлении $P=0,098$ МПа, в диапазоне температур от 323,15 до 423,15 К составляет примерно ± 5 %. Однако максимальное значение погрешности достигает ± 15 %, что значительно превышает данные, указанные авторами исследования [18]. При давлениях, превышающих атмосферное, с увеличением давления до 39,2 МПа отклонения расчетных данных от корреляционного уравнения (1) возрастают в диапазоне от 5 до 17 %. Это также заметно выше, чем оценки погрешности, предоставленные авторами [18]. Различия расчетных данных уравнения Филиппова (7) по отношению к корреляционному уравнению (1) можно объяснить определенными ограничениями, наложенными на χ .

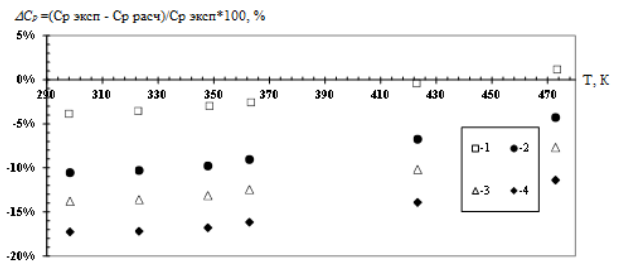


Рис. 5 - Отклонения ΔC_p расчетных данных изобарной теплоемкости рыбьего жира по методу Филиппова от уравнения (1) в зависимости от температуры при различных давлениях: 1 – 9,8 МПа; 2 – 19,6 МПа; 3 – 29,4 МПа; 4 – 39,2 МПа

Fig. 5 – ΔC_p deviations of calculated data of isobaric heat capacity of fish oil by Filippov's method from equation (1) as a function of temperature at different pressures: 1 - 9.8 MPa; 2 - 19.6 MPa; 3 - 29.4 MPa; 4 - 39.2 MPa

Заключение

Было проведено исследование по измерению изобарной теплоемкости рыбьего жира (OMEGA-3 “950”) под давлением с использованием дифференциального сканирующего калориметра. Получены новые экспериментальные данные по теплоемкости при давлениях до 39,2 МПа и температурах до 473,15 К. Разработано корреляционное уравнение, представляющее экспериментальные данные по теплоемкости рыбьего жира с погрешностью менее 0,3 % в исследованном диапазоне температур и давлений.

Благодарности

Данное исследование проведено при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН BR18574219).

Литература

1. P. Andreo-Martinez, V.M. Ortiz-Martinez, N. Garcia-Martinez. *Appl. Ener.* **264**, 1147-1153 (2020).
2. V.S. Neto, S. Derenzo, M.P. de Araujo Marin. *Braz. J. of Chem. Eng.* **3**, 1-11 (2023).
3. Ф.М. Гумеров, *Сверхкритические флюидные технологии: учебник для вузов*. СПб.: Лань, 2022. 652 с.
4. Е.В. Мызгина, Б.Э. Любомудров, Е.Ф. Климова, Труды *Ural project of energy conference*, 19 декабря 2022 г., Екатеринбург. 2022.
5. С.В. Мазанов, З.И. Зарипов, Ф.М. Гумеров. *Изв. высш. уч. зав. Проблемы энергетики.* **24**(4), 16-49 (2022).
6. С.В. Мазанов, З.И. Зарипов, Ф.М. Гумеров. *Изв. высш. уч. зав. Проблемы энергетики.* **24** (5) 35-60 (2022).
7. P.H.V. Konynenburg, R.L. Scott. *Philosoph. Trans. of the Royal Soc. A: Mathematical, Phys. and Eng. Sci.* **298**, 494-540 (1980).
8. D.F. Williams. *J. Chem. Eng. Sci.* **36** (11), 1769-1788 (1981).
9. S.A. Idris, N.R. Rosli. *Mater. Today: Proc.* **63**, 462-466 (2022).
10. J.Y.J. Yeo, F.E. Soetaredjo. *J. of Ind. and Eng. Chem.* **97**, 485-491 (2021).
11. C. Palaric, S. Atwi-Ghaddar, Q. Gros. *J. of CO₂ Utiliz.* **77**, 102-106 (2023).

12. М.В. Козлова, Труды XIII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум – 2021». 12 октября 2020 г., Москва, 2021.
13. S. Sathivel, W. Prinyawiwatkul, I.I. Negulescu, *J. Am. Oil Chem. Soc.* **85**, 291–296 (2008).
14. S. Sathivel. *JAOCS*. **82**(2) 142-157 (2005).
15. А. У. Аетов, З.И. Зарипов, С.В. Мазанов, Ф.М. Гумеров. *Вестник Каз. Гос. Техн. Ун. им. А.Н. Туполева - КАИ*. **76**(1), 5-9 (2020).
16. Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд, *Свойства газов и жидкостей*. Л.: Химия, 1982. 591 с.
17. D.N. Rihany, L.K. Doraisamy. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* **4**, 17–21 (1965).
18. Л.П. Филиппов, *Прогнозирование теплофизических свойств жидкостей и газов*. М.: Энергоатомиздат, 1988. 168 с.
19. V. Ruzicka, E.S. Domalski. *J. Phys. Chem. Ref. Data.* **22**, 619–657 (1993).
20. R. Ceriani, R. Gani, A.J.A. Meirelles. *Fluid Phase Equilibria*. **283**, 49–55 (2009).
21. X. Zhu, D.M. Phinney, S. Paluri. *J. of Food Sci.* **83**, 992-997 (2018).
22. Z.I. Zaripov, A.U. Aetov, R.R. Nakipov. *J. Mol. Liquids*. **307**, 1-9 (2020).
23. Z.I. Zaripov, A.U. Aetov, R.R. Nakipo. *J. Chem. Therm.* **152**, 1-15 (2021).
24. W. Wagner, A. Pruß *J. Phys. Chem. Ref. Data.* **31**, 387-535 (2002).
6. S. V. Mazanov, Z. I. Zaripov, F. M. Gumerov. *Proceedings of the higher educational head. Problems of Energy.* **24**(5) 35-60 (2022).
7. P.H.V. Konynenburg, R.L. Scott. *Philosoph. Trans. of the Royal Soc. A: Mathematical, Phys. and Eng. Sci.* **298**, 494-540 (1980).
8. D.F. Williams. *J. Chem. Eng. Sci.* **36** (11), 1769-1788 (1981).
9. S.A. Idris, N.R. Rosli. *Mater. Today: Proc.* **63**, 462-466 (2022).
10. J.Y.J. Yeo, F.E. Soetaredjo. *J. of Ind. and Eng. Chem.* **97**, 485-491 (2021).
11. C. Palaric, S. Atwi-Ghaddar, Q. Gros. *J. of CO₂ Utiliz.* **77**, 102-106 (2023).
12. M.V. Kozlova, *Proceedings of the XIII International Student Scientific Conference "Student Scientific Forum - 2021"*. October 12, 2020, Moscow, 2021.
13. S. Sathivel, W. Prinyawiwatkul, I.I. Negulescu, *J. Am. Oil Chem. Soc.* **85**, 291–296 (2008).
14. S. Sathivel. *JAOCS*. **82**(2) 142-157 (2005).
15. А. У. Аетов, З. И. Зарипов, С. В. Мазанов, Ф. М. Гумеров. *Bulletin of the Kazakh State Technological University named after A. N. Tupolev - KAI*. **76**(1), 5-9 (2020).
16. R. Reed, J. Prausnitz, T. Sherwood, *Properties of Gases and Liquids*. Leningrad: Chemistry, 1982. 591 p.
17. D.N. Rihany, L.K. Doraisamy. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* **4**, 17–21 (1965).
18. L.P. Filippov, *Forecasting of thermophysical properties of liquids and gases*. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 168 p.
19. V. Ruzicka, E.S. Domalski. *J. Phys. Chem. Ref. Data.* **22**, 619–657 (1993).
20. R. Ceriani, R. Gani, A.J.A. Meirelles. *Fluid Phase Equilibria*. **283**, 49–55 (2009).
21. X. Zhu, D.M. Phinney, S. Paluri. *J. of Food Sci.* **83**, 992-997 (2018).
22. Z.I. Zaripov, A.U. Aetov, R.R. Nakipov. *J. Mol. Liquids*. **307**, 1-9 (2020).
23. Z.I. Zaripov, A.U. Aetov, R.R. Nakipo. *J. Chem. Therm.* **152**, 1-15 (2021).
24. W. Wagner, A. Pruß *J. Phys. Chem. Ref. Data.* **31**, 387-535 (2002).

References

1. P. Andreo-Martínez, V.M. Ortiz-Martínez, N. García-Martínez. *Appl. Ener.* **264**, 1147-1153 (2020).
2. V.S. Neto, S. Derenzo, M.P. de Araujo Marin. *Braz. J. of Chem. Eng.* **3**, 1-11 (2023).
3. F. M. Gumerov, *Supercritical Fluid Technologies: Textbook for Universities*. SPb.: Lan, 2022. 652 p.
4. E. V. Myzgina, B. E. Lyubomudrov, E. F. Klimova, *Proceedings of the Ural Project of Energy Conference*, December 19, 2022, Ekaterinburg. 2022.
5. S. V. Mazanov, Z. I. Zaripov, F. M. Gumerov. *Proceedings of the higher educational head. Problems of Energy.* **24**(4), 16-49 (2022).

© **З. И. Зарипов** – д.т.н., профессор кафедры Теоретических основ теплотехники (ТОТ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, zufar_zaripov@mail.ru; **С. В. Мазанов** – к.т.н., доцент кафедры ТОТ, КНИТУ, serg989@yandex.ru; **А. У. Аетов** – ассистент кафедры ТОТ, КНИТУ, aetovalmaz@mail.ru; **Ю. А. Шаповалов** – д.т.н., профессор кафедры Биофизики, биомедицины и нейронауки, Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби, Алма-Аты, Казахстан, yu.shapovalov@mail.ru.

© **Z. I. Zaripov** – Professor, Department of Theoretical Fundamentals of Thermal Engineering (TFTE), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, zufar_zaripov@mail.ru; **S. V. Mazanov** – Associate Professor, the TFTE department, KNRTU, serg989@yandex.ru; **A. U. Aetov** – Assistant Professor, the TFTE department, KNRTU, aetovalmaz@mail.ru; **Yu. A. Shapovalov** – Professor, Department of Biophysics, Biomedicine and Neuroscience, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, yu.shapovalov@mail.ru.