

УДК 536.1/.62/.63; 665.1/.3

Исследование температурной зависимости удельной теплоемкости рафинированных растительных масел от содержания ненасыщенных жирных кислот триацилглицеринов

В. А. КРЫЛОВ¹, канд. хим. наук С. М. ВОЛКОВ², д-р техн. наук И. В. БАРАНОВ¹,
канд. техн. наук Е. В. ТАМБУЛАТОВА¹, д-р техн. наук А. В. ФЕДОРОВ^{1,2*}

¹Университет ИТМО

²ВНИИЖиров

*E-mail: afedorov@itmo.ru

Представлены результаты исследований удельной теплоемкости рафинированных растительных масел в зависимости от содержания в их составе мононенасыщенных и диненасыщенных жирных кислот триацилглицеринов в диапазоне температур от 20 до 150 °С. Установлено, что при увеличении суммарной концентрации моноеновых жирных кислот в растительных маслах их удельная теплоёмкость нелинейно увеличивается, а при увеличении суммарной концентрации диеновых жирных кислот в растительных маслах их удельная теплоёмкость нелинейно уменьшается. Получены расчетные зависимости удельной теплоёмкости рафинированных растительных масел от температуры, а также от суммарного содержания мононенасыщенных (МНЖК) или диненасыщенных (ДНЖК) жирных кислот в составе рафинированных растительных масел в температурном интервале от 40 до 140 °С.

Ключевые слова: удельная теплоемкость, рафинированные растительные масла, жирнокислотный состав, мононенасыщенные жирные кислоты, диненасыщенные жирные кислоты, полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК).

Информация о статье:

Поступила в редакцию 07.02.2024, одобрена после рецензирования 10.04.2024, принята к печати 15.04.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-43-49.

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Крылов В. А., Волков С. М., Баранов И. В., Тамбулатова Е. В., Федоров А. В. Исследование температурной зависимости удельной теплоемкости рафинированных растительных масел от содержания ненасыщенных жирных кислот триацилглицеринов // Вестник Международной академии холода. 2024. № 2. С. 43–49. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-43-49.

Research of the temperature dependence of the specific heat capacity of refined vegetable oils on the content of unsaturated fatty acids

V. A. KRYLOV¹, Ph. D. S. M. VOLKOV², D. Sc. I. V. BARANOV¹

Ph. D. E. V. TAMBULATOVA³, D. Sc. A. V. FEDOROV^{1,2*}

¹ITMO University

²All-Russian Scientific Research Institute of Fats

*E-mail: afedorov@itmo.ru

The results of studies of the specific heat capacity of refined vegetable oils are presented depending on the content of monounsaturated and diunsaturated triacylglycerol fatty acids in their composition in the temperature range from 20 to 150 °C. It has been established that with an increase in the total concentration of monoenoic fatty acids in vegetable oils, their specific heat capacity increases nonlinearly, and with an increase in the total concentration of dienoic fatty acids in vegetable oils, their specific heat capacity decreases nonlinearly. Calculated dependences of the specific heat capacity of refined vegetable oils on temperature, as well as on the total content of monounsaturated (MUFA) or diunsaturated (DNFA) fatty acids in the composition of refined vegetable oils in the temperature range from 40 to 140 °C were obtained.

Keywords: specific heat capacity, refined vegetable oils, fatty acid composition, monounsaturated fatty acids, diunsaturated fatty acids, polyunsaturated fatty acids (PUFAs).

Article info:

Received 07/02/2024, approved after reviewing 10/04/2024, accepted 15/04/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-43-49

Article in Russian

For citation:

Krylov V. A., Volkov S. M., Baranov I. V., Tambulatova E. V., Fedorov A. V. Research of the temperature dependence of the specific heat capacity of refined vegetable oils on the content of unsaturated fatty acids. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 2. p. 43-49. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-43-49

Введение

Результаты системных исследований теплофизических свойств растительных масел в широком интервале температур с использованием современных методов измерений представляют собой ценную научную информацию. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы как для моделирования параметров жидкого состояния растительных масел, так и для расчета параметров технологических процессов и аппаратов в масложировом производстве с целью их интенсификации и повышения энергоэффективности. Важным направлением такого рода исследований является измерение удельной теплоемкости растительных масел в зависимости от температуры, а также от их состава.

В работе [1] представлены результаты измерения удельной теплоемкости образцов рафинированных высокоолеиновых подсолнечных масел и низкоолеиновых подсолнечных масел с различным жирнокислотным составом. На основании полученных экспериментальных данных было выявлено существенное уменьшение численных значений средней удельной теплоемкости рафинированных низкоолеиновых подсолнечных масел различных сортов, в жирнокислотном составе которых содержится до 70 % диеновых жирных кислот, по сравнению с численными значениями средней удельной теплоемкости высокоолеиновых подсолнечных масел различных сортов, в жирнокислотном составе которых содержится до 15 % диеновых жирных кислот. В ходе исследований было установлено, что при температуре 20 °С средняя удельная теплоемкость рафинированных подсолнечных масел линолевого типа снижается на 5–10%, а при температуре 140 °С на 3–5%.

В работе [2] было показано, что при увеличении концентрации фосфатидов примерно от 0,02 до 1,5% происходит увеличение численных значений удельной теплоемкости модельных образцов подсолнечного масла почти на 10%. Аналогичные данные о характере температурной зависимости удельной теплоемкости подсолнечного масла линолевого типа от содержания α -токоферола получены в [3]. При увеличении концентрации α -токоферола от 0,039% до 0,45% численное значение удельной теплоемкости при температуре 20 °С возросло от 1963 Дж/(кг·К) до 2004 Дж/(кг·К). При температуре 140 °С рост удельной теплоемкости наблюдался на том же уровне и составлял порядка 2%. Температурная зависимость удельной теплоемкости растительных масел была исследована так же в работах [4, 5].

Авторы [4, 6, 7] подтвердили в своих многочисленных экспериментальных работах нелинейный характер температурных зависимостей теплоемкости. В кратком сообщении [8] автор представила данные в интервале от 35 до 180 °С, полученные с использованием сканирующего калориметра. Большую серию экспериментов по теплофизическим свойствам провели специалисты [9] при эмульгировании растительных масел. В публика-

ции [10] приставлен большой массив данных, полученный с помощью ДСК метода, где отмечена существенная линейная зависимость теплоемкости от температуры в диапазоне от 35 до 180 °С. Авторы [11] подчеркивают, что МНЖК, присутствующие в авокадо и оливковом масле первого холодного отжима, обуславливают более высокую удельную теплоемкость в этих маслах, а присутствие ПНЖК, содержащихся в основном в льняном масле первого отжима, снижает удельную теплоемкость в диапазоне от 25 до 90 °С.

При производстве биодизеля также необходимы актуальные данные по теплоемкости используемых растительных масел. К примеру, в работе [12] приводятся результаты серии экспериментов с обработкой данных. При производстве смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и шлифовальных паст точные значения теплоемкости также необходимы, что подчеркивают в своем исследовании, авторы [13, 14]. Целью их исследования является изучение влияния вязкости, поверхностного натяжения и теплоемкости в связи с молекулярной структурой растительных масел на их охлаждающие и смазочные свойства.

Авторами [15, 16] разработаны научные принципы формирования математических моделей температурных зависимостей удельной теплоемкости растительных масел от их удельного объема и плотности в широком интервале температур, а также от их жирнокислотного состава в температурном интервале 40–80 °С.

Анализ научных работ, в которых представлены результаты исследований характера изменения удельной теплоемкости пищевых растительных масел различного состава показал, что зависимость удельной теплоемкости от содержания в их триглицеридах радикалов МНЖК и ПНЖК при температурах менее 40 °С более 80 °С не установлена. С учетом того, что большинство технологических процессов переработки масличного сырья и растительных масел происходят при температурах более 80 °С данное направление исследований их физических свойств является актуальным.

Методы и объекты исследования

В качестве объекта исследования температурной зависимости удельной теплоемкости рафинированных растительных масел от содержания в их составе триацилглицеринов МНЖК и ПНЖК жирных кислот были выбраны образцы высокоолеиновых, среднеолеиновых и низкоолеиновых масел. Измерения проводились для высокоолеинового подсолнечного масла, оливкового масла, масла авокадо, кориандрового масла, рапсового масла, рисового масла, подсолнечного масла линолевого типа, кукурузного масла, а также смеси подсолнечного и кукурузного масел.

Для жирных кислот триацилглицеринов были приняты условные обозначения: миристиновая — С14:0; пальмитиновая — С16:0; пальмитолеиновая — С16:1;

Жирнокислотный состав высокоолеиновых рафинированных растительных масел

Таблица 1

Fatty acid composition of highly oleic refined vegetable oils

№	Условное обозначение жирной кислоты	Высокоолеиновое подсолнечное	Оливковое	Кориандровое	Авокадо
1	C14:0	0,1	—	—	—
2	C16:0	4,5	11,1	3,0	14,6
3	C16:1	0,1	0,9	0,6	5,2
4	C17:0	—	—	0,2	0,1
5	C18:0	2,6	3,4	0,8	1,5
6	C18:1	83,2	72,6	78,9	64,4
7	C18:2	7,8	10,2	15,4	12,8
8	C18:3	—	0,7	0,3	0,7
9	C20:0	0,5	0,5	0,2	0,2
10	C20:1	—	0,4	0,4	0,3
11	C20:2	—	—	—	—
12	C22:0	0,9	0,2	0,2	0,2
13	C24:0	0,3	—	—	—

маргариновая — C17:0 стеариновая — C18:0; олеиновая — C18:1; линолевая — C18:2; линоленовая — C18:3; арахисовая — C20:0; гондоиновая — C20:1; эйкозодиеновая — C20:2; бегеновая — C22:0; эруковая — C22:1; докозодиеновая — C22:2; лигноцериновая — C24:0; селехолевая — C24:1.

Определение жирнокислотного состава нерафинированных растительных масел осуществляли в соответствии с ГОСТ 31663 и ГОСТ 31665 на хроматографе Bruker Scion 436 GC с использованием капиллярной колонки длиной 30 м, диаметром 0,25 мм и фазой на основе полиэтиленгликоля. Результаты исследований жирнокислотного состава образцов растительных масел представлен в табл. 1, 2.

Удельная теплоемкость образцов рафинированных растительных масел определялась методом дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе DSC 204 F1 при непрерывном повышении температуры в интервале от 40 °С до 140 °С [17].

Результаты и обсуждение

Полученные зависимости удельных теплоемкостей, исследованных образцов от температуры представлены на рис. 1, 2.

На основании экспериментальных данных, представленных на рис. 1 и рис. 2, были построены зависимости удельной теплоемкости исследованных образцов растительных масел от суммарного содержания МНЖК (C16:1, C18:1, C20:1, C22:1, C24:1) и ДНЖК (C18:2, C20:2, C22:2) в их триглицеридах. Для решения задачи математического моделирования зависимости удельной теплоемкости растительных масел от температуры и суммарных концентраций МНЖК и ДНЖК на основании данных, представленных на рис. 1 и рис. 2, были построены зависимости удельной теплоемкости от суммарного содержания ненасыщенных жирных кислот при темпера-

Жирнокислотный состав средне и низкоолеиновых рафинированных растительных масел

Таблица 2

Fatty acid composition of medium and low oleic refined vegetable oils

№	Условное обозначение жирной кислоты	Рапсовое	Рисовое	Кукурузное	Смесь кукурузного и подсолнечного	Подсолнечное масло линолевого типа
1	C14:0	0,2	0,3	0,2	—	0,1
2	C16:0	4,5	19,3	8,9	6,0	6,2
3	C16:1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1
4	C17:0	—	—	0,1	—	—
5	C18:0	2,1	2,1	2,8	2,7	3,3
6	C18:1	62,4	42,2	31,0	24,8	27,6
7	C18:2	20,7	32,2	54,6	65,1	61,1
8	C18:3	7,4	1,3	0,5	0,1	0,2
9	C20:0	0,6	0,9	0,6	0,3	0,3
10	C20:1	1,2	0,6	0,5	0,2	0,2
11	C20:2	0,1	—	—	—	—
12	C22:0	0,3	0,3	0,5	0,4	0,6
13	C22:1	0,1	—	—	0,3	—
14	C22:2	0,1	—	—	—	—
15	C24:0	0,1	0,5	0,2	—	0,3

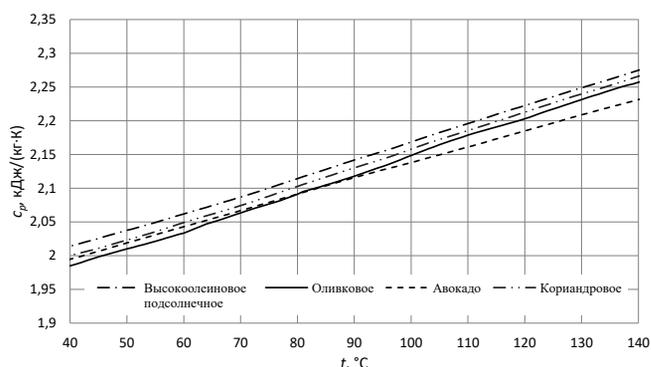


Рис. 1. Зависимость удельных теплоемкостей высокоолеиновых растительных масел от температуры
Fig. 1. Dependence of specific heat capacities of high oleic vegetable oils on temperature

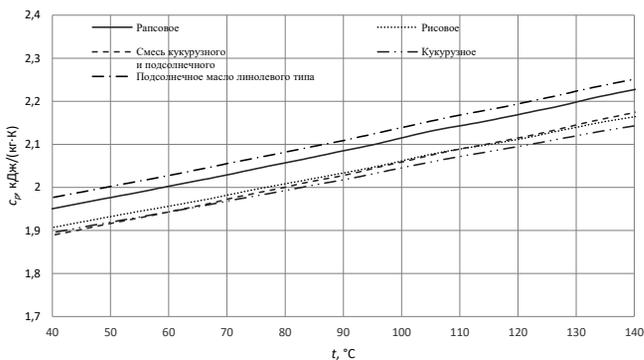


Рис. 2. Зависимость удельных теплоемкостей среднеолеиновых и низкоолеиновых растительных масел от температуры
Fig. 2. Dependence of specific heat capacities of medium-oleic and low-oleic vegetable oils on temperature

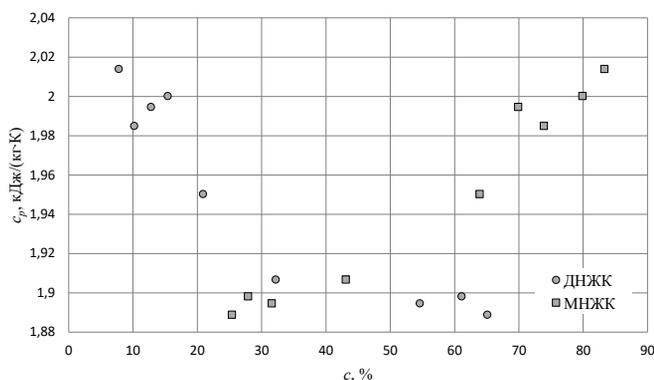


Рис. 3. Зависимости удельной теплоемкости образцов растительных масел от суммарного содержания жирных кислот при температуре 40 °С

Fig. 3. Dependence of the specific heat capacity of vegetable oil samples on the total content of fatty acids at a temperature of 40 °C

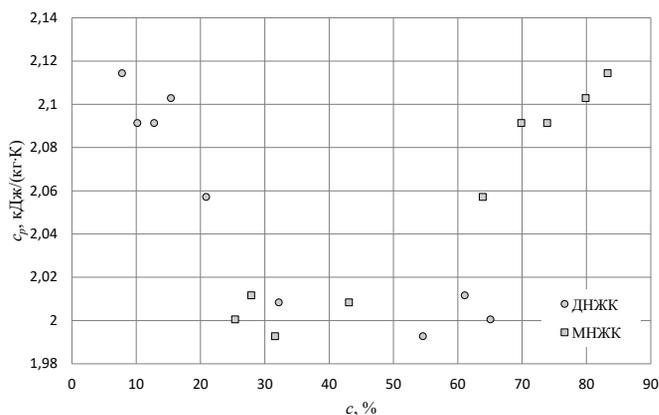


Рис. 4. Зависимости удельной теплоемкости образцов растительных масел от суммарного содержания жирных кислот при температуре 80 °С

Fig. 4. Dependence of the specific heat capacity of vegetable oil samples on the total content of fatty acids at a temperature of 80 °C

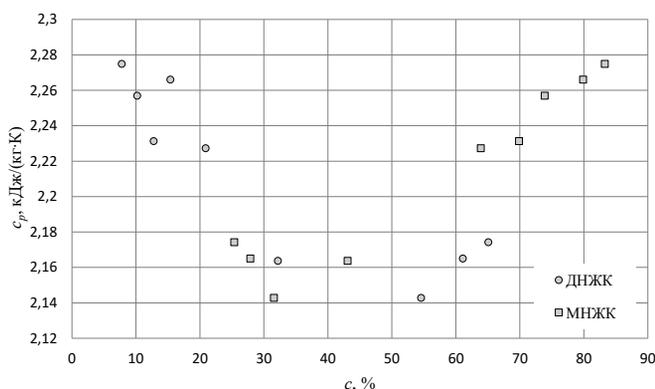


Рис. 5. Зависимости удельной теплоемкости образцов растительных масел от суммарного содержания жирных кислот при температуре 140 °С

Fig. 5. Dependence of the specific heat capacity of vegetable oil samples on the total content of fatty acids at a temperature of 140 °C

турах от 40 °С до 140 °С с интервалом 10 °С. На рис. 3, рис. 4 и рис. 5 приведены расчетные данные для температур 40 °С, 80 °С и 140 °С, подтверждающие их общий характер во всем исследованном интервале температур.

Представленные на рис. 3–5 зависимости для суммарного содержания мононенасыщенных жирных кислот, аппроксимируются математическими функциями:

для $t=40$ °С

$$c_p = 2,11 \cdot 10^{-5} c^2 + 1,08 \cdot 10^{-4} c + 1,88; \quad (1)$$

для $t=80$ °С

$$c_p = 2,62 \cdot 10^{-5} c^2 + 7,59 \cdot 10^{-4} c + 2,00; \quad (2)$$

для $t=140$ °С

$$c_p = 3,51 \cdot 10^{-5} c^2 + 1,70 \cdot 10^{-4} c + 2,18. \quad (3)$$

Линейная регрессия для полученных функций составила 0,972, 0,968 и 0,951, соответственно.

Представленные на рис. 3–5 расчетные данные для суммарного содержания диненасыщенных жирных кислот, аппроксимируются математическими функциями: для $t=40$ °С

$$c_p = 5,67 \cdot 10^{-5} c^2 - 6,20 \cdot 10^{-3} c + 2,06; \quad (4)$$

для $t=80$ °С

$$c_p = 6,29 \cdot 10^{-5} c^2 - 6,52 \cdot 10^{-3} c + 2,16; \quad (5)$$

для $t=140$ °С

$$c_p = 7,12 \cdot 10^{-5} c^2 - 7,11 \cdot 10^{-3} c + 2,33. \quad (6)$$

Линейная регрессия для полученных функций составила 0,948, 0,946 и 0,912, соответственно.

Математические функции (1), (2) и (3) показывают, что во всем интервале температур при увеличении суммарного содержания МНЖК наблюдается увеличение численных значений удельной теплоемкости. Экспериментальные данные аппроксимируются функциями общего вида:

$$c_p = k \cdot 10^{-5} c^2 + l \cdot 10^{-4} c + m. \quad (7)$$

Математические функции (4), (5) и (6) показывают, что в исследованном температурном диапазоне при росте суммарного содержания ДНЖК наблюдается снижение численных значений удельной теплоемкости. Результаты могут быть описаны функциями общего вида:

$$c_p = k \cdot 10^{-5} c^2 - l \cdot 10^{-3} c + m. \quad (8)$$

Нелинейный характер зависимостей, представленных на рис. 3–6, объясняется корреляцией суммарного содержания МНЖК триглицеридов и суммарного содержания ДНЖК триглицеридов в жирнокислотном составе растительных масел. Данные о жирнокислотных составах растительных масел, приведенные в табл. 1 и табл. 2, показывают, что при уменьшении суммарного количества МНЖК в одном и том же образце растительного масла суммарное содержание ДНЖК в нем соответствующим образом возрастает. Однако влияние каждого из этих параметров на удельную теплоемкость имеет

Таблица 3

Численные значения относительного отклонения данных моделирования температурной зависимости удельной теплоемкости образцов растительных масел для различных математических моделей

Table 3

Numerical values of relative deviation modeling data of the temperature dependence of the specific heat capacity of vegetable oil samples for various mathematical models

Наименование растительного масла	Относительное отклонение по уравнению (9), %	Относительное отклонение по уравнению (10), %	Относительное отклонение по модели [15], %	Относительное отклонение по модели [16], %
Высокоолеиновое подсолнечное масло	0,42	0,19	2,4	0,51
Оливковое	0,65	0,64	2,54	1,57
Кориандровое	0,26	1,06	2,67	0,66
Авокадо	0,95	0,34	2,67	1,71
Рапсовое	0,50	0,26	3,60	2,29
Рисовое	0,10	0,69	2,60	2,67
Кукурузное	0,31	0,69	2,78	5,17
Смесь кукурузного и подсолнечного	0,39	0,95	4,11	4,22
Подсолнечное масло линолевого типа	4,3	3,50	2,64	0,35
Среднее отклонение по всем видам масел, %	0,88	0,92	2,89	2,13

противоположно направленный характер. Это вызывает более интенсивное увеличение удельной теплоёмкости при возрастании суммарного содержания МНЖК и, соответственно, менее интенсивное снижение удельной теплоемкости при увеличении суммарного содержания ДНЖК.

Таким образом, полученные математические зависимости позволяют определять удельную теплоемкость рафинированных растительных масел в интервале от 40 °С до 140 °С, исходя из суммарного состава МНЖК или ДНЖК.

При этом, как видно из данных табл. 2, концентрация триеновых жирных кислот в рапсовом масле составляет около 7 %. В работе [16], авторы отметили, что присутствие триеновых жирных кислот снижает численные значения удельной теплоемкости растительных масел, однако системных данных, подтверждающих их вывод приведено не представлено. Эта проблема требует более глубокого исследования, так как по нашим предположениям концентрация триеновых жирных кислот очевидно должна влиять на характер уравнений (7) и (8).

Полученные экспериментальные и расчетные данные были использованы для математического моделирования температурных зависимостей удельных теплоёмкости каждого из исследованных образцов растительных масел с целью получения двухпараметрических уравнений, содержащих в качестве переменных температуру, а также суммарную концентрацию МНЖК или ДНЖК. Данные, представленные на рис. 1 и 2, аппроксимируются соответственно уравнениями:

$$c_p = (2 \cdot 10^{-7}t + 1 \cdot 10^{-5})c^2 - (2 \cdot 10^{-5}t - 7 \cdot 10^{-4})c + 3,1 \cdot 10^{-3}t + 1,7554; \tag{9}$$

$$c_p = (2 \cdot 10^{-7}t + 5 \cdot 10^{-5})c^2 - (1 \cdot 10^{-5}t + 5,7 \cdot 10^{-3})c + 2,7 \cdot 10^{-3}t + 1,9506. \tag{10}$$

Для сравнения эффективности математических моделей, полученных авторами [15, 16], а также функций

(9) и (10), были проведены соответствующие вычисления. Относительные отклонения результатов вычислений в сравнении с экспериментальными данными температурной зависимости удельной теплоёмкости исследуемых масел представлены в табл. 3.

Из данных табл. 3 следует, что относительные отклонения расчетных данных от экспериментальных, полученные при вычислении удельной теплоемкости с использованием уравнений (7) и (8), существенно ниже практически для всех типов исследованных растительных масел по сравнению с аналогичными данными, полученными с использованием уравнений, предложенных в [15, 16]. Исключением являются результаты моделирования температурной зависимости удельной теплоемкости для подсолнечного масла линолевого типа. В этом случае уравнение, полученное авторами [16], показало меньшее относительное отклонение по сравнению с остальными моделями, указанными в табл. 3. Однако при этом среднее отклонение по всем видам исследованных растительных масел, полученное для уравнений (7) и (8) почти в 2,4 раза ниже по сравнению с аналогичным результатом для уравнения авторов [16], а так же почти в 3,3 раза ниже, чем для уравнения, полученного в работе [16].

Для решения более сложной задачи математического моделирования температурной зависимости удельной теплоемкости рафинированных растительных масел с учетом влияния на нее концентраций ПНЖК при температурах менее 40 °С и более 140 °С требуются дополнительные системные исследования с использованием разработанного в данной работе научного подхода.

Заключение

Определены температурные зависимости удельной теплоемкости от суммарного содержания МНЖК и ДМЖК для образцов высокоолеиновых, среднеолеиновых и низкоолеиновых рафинированных растительных масел при различных температурах в температурном интервале от 40 °С до 140 °С.

Результаты исследования позволили установить нелинейный характер зависимости удельной теплоемкости рафинированных растительных масел от суммарного содержания МНЖК и от суммарного содержания ДНЖК в температурном интервале от 40 °С до 140 °С.

Снижение средней удельной теплоемкости растительных масел линолевого типа, содержащих в своих жирнокислотных составах наибольшее суммарное количество диеновых жирных кислот, относительно средней удельной теплоемкости высокоолеиновых растительных масел, содержащих в своих жирнокислотных составах наименьшее суммарное количество диеновых жирных

кислот, при температуре 20 °С составляет порядка 7 %, а при температуре 140 °С — около 5 %.

Получены двухпараметрические уравнения зависимости удельной теплоемкости от температуры, а также от концентрации МНЖК или ДНЖК, позволяющие снизить среднее относительное отклонение почти в 2,4 раза, по сравнению с используемыми в настоящее время моделями.

Данные измерений удельной теплоемкости рафинированных растительных масел могут быть использованы для повышения точности расчетов технологических процессов маслопереработки.

Литература

1. Федоров А. В., Баранов И. В., Тамбулатова Е. В., Волков С. М., Прохорова Л. Т., Крылов В. А. Исследование температурных зависимостей удельной теплоемкости рафинированных подсолнечных масел от их состава методом дифференциальной сканирующей калориметрии // Вестник Международной академии холода. 2019. № 1. С. 52–63. DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-1-52-63
2. Fedorov A., Volkov S., Novoselov A., Fedorov A., Tambulatova E., Krylov V. A. Influence of Phosphatide Content in the Unrefined Sunflower Oil on Its Thermal and Rheological Properties // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 852. No 1. pp. 012032. DOI 10.1088/1755-1315/852/1/012032
3. Федоров А. В., Волков С. М., Прохорова Л. Т., Тамбулатова Е. В., Крылов В. А. Исследование характера температурной зависимости удельной теплоёмкости смесей рафинированного подсолнечного масла с токоферолами // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров. 2023. № 1–2. С. 30–33.
4. Остриков А. Н. и др. Исследование теплофизических и реологических свойств пищевых растительных масел // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 36–43. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.005
5. Шукрихудоёв Х. Д., Маджидов Х. Теплофизические свойства растительных масел и их растворов // Вестник педагогического университета. 2019. № 1–2. С. 108–110.
6. Остриков А. Н. и др. Анализ теплофизических характеристик рапсового масла // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания. 2017. № 5 (19). С. 107–112.
7. Остриков А. Н., Копылов М. В. Купажированное растительное масло-функциональный продукт питания // Успехи современного естествознания. 2011. № 7. С. 171–172.
8. Климова Е. В. Определение вязкости и удельной теплоемкости как функции температуры (от 35 до 180 °С) у 12 растительных масел. (США) // Пищевая и перерабатывающая промышленность. 2010. № 4. С. 1176–1176.
9. Акопян Х. Н. Экспериментальные исследования получения СОЖ ультразвуковым эмульгированием растительных масел в воде и оценка эффективности их применения // Наука, техника и образование. 2019. № 4 (57). С. 67–71.
10. Fasina O. O., Colley Z. Viscosity and specific heat of vegetable oils as a function of temperature: 35 C to 180 C // International journal of food properties. 2008. vol. 11. no 4. p. 738–746. DOI: 10.1080/10942910701586273
11. Contreras-Gallegos E. et al. Specific heat of vegetable oils as a function of temperature obtained by adiabatic scanning

References

1. Fedorov A. V., Baranov I. V., Tambulatova E. V., Volkov S. M., Prokhorova L. T., Krylov V. A. Investigation of temperature dependences of specific heat capacity of refined sunflower oils on their composition by differential scanning calorimetry. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2019. No 1. pp. 52–63. DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-1-52-63 (in Russian)
2. Fedorov A., Volkov S., Novoselov A., Fedorov A., Tambulatova E., Krylov V. A. Influence of Phosphatide Content in the Unrefined Sunflower Oil on Its Thermal and Rheological Properties. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 852. No. 1. pp. 012032. DOI 10.1088/1755-1315/852/1/012032
3. Fedorov A. V., Volkov S. M., Prokhorova L. T., Tambulatova E. V., Krylov V. A. Investigation of the nature of the temperature dependence of the specific heat capacity of mixtures of refined sunflower oil with tocopherols. *Vestnik of the All-Russian Scientific Research Institute of Fats*. 2023. No 1–2. pp. 30–33. (in Russian)
4. Ostrikov A. N. et al. Investigation of thermophysical and rheological properties of edible vegetable oils. *Polzunovskij vestnik*. 2021. no 2. pp. 36–43. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.005. (in Russian)
5. Shukrikhudoёv H. D., Majidov H. Thermophysical properties of vegetable oils and their solutions. *Bulletin of the Pedagogical University (Natural Sciences)*. 2019. No. 1–2. pp. 108–110. (in Russian)
6. Ostrikov A. N. et al. Analysis of the thermophysical characteristics of rapeseed oil. *Technologies of the food and processing industry of the agro — industrial complex-healthy food products*. 2017. No 5 (19). pp. 107–112. (in Russian)
7. Ostrikov A. N., Kopylov M. V. Blended vegetable oil is a functional food product. *The successes of modern natural science*. 2011. No. 7. pp. 171–172. (in Russian)
8. Klimova E. V. Determination of viscosity and specific heat capacity as a function of temperature (from 35 to 180 °C) in 12 vegetable oils. (USA). *Food and processing industry*. 2010. No 4. pp. 1176–1176. (in Russian)
9. Akopyan H. N. Experimental studies of the production of coolant by ultrasonic emulsification of vegetable oils in water and evaluation of the effectiveness of their application. *Science, technology and education*. 2019. No 4 (57). pp. 67–71. (in Russian)
10. Fasina O. O., Colley Z. Viscosity and specific heat of vegetable oils as a function of temperature: 35 C to 180 C. *International journal of food properties*. 2008. V. 11. No. 4. pp. 738–746. DOI: 10.1080/10942910701586273

- calorimetry // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017. vol. 128. p. 523–531. DOI:10.1007/s10973-016-5864-1
12. Samanta A., Roy P. C. Pragmatic Analysis on Performance and Emission and a Single-Zone Engine Model Development with Inedible Neem and Waste Vegetable Oil Biodiesel Blend (B10) // *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2021. vol. 22. no 1. DOI: 10.1615/InterJ Ener CleanEnv. 2020035349
 13. Singh H., Sharma V. S., Dogra M. Exploration of graphene assisted vegetables oil based minimum quantity lubrication for surface grinding of TI-6AL-4V-ELI // *Tribology International*. 2020. vol. 144. p. 106113. DOI:10.1016/j.triboint. 2019.106113
 14. Zhang X. et al. Vegetable oil-based nanolubricants in machining: from physicochemical properties to application // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2023. vol. 36. no 1. p. 76. DOI:10.1186/s10033-023-00895-5
 15. Юсупов Ш. Т. Теплофизические и термодинамические свойства растительных масел и некоторых их растворов в широком интервале температур и давлений. 2012.
 16. Zhu X. et al. Prediction of liquid specific heat capacity of food lipids. // *Journal of food science*. 2018. vol. 83. no. 4. p. 992–997.
 17. Федоров А. В., Тамбулатова Е. В., Баланов П. Е., Федоров А. А., Крылов В. А. Прикладные теплофизические аспекты в биотехнологии: учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2024. 88 с.
 11. Contreras-Gallegos E. et al. Specific heat of vegetable oils as a function of temperature obtained by adiabatic scanning calorimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017. Vol. 128. pp. 523–531. DOI: 10.1080/10942910701586273
 12. Samanta A., Roy P. C. Pragmatic Analysis on Performance and Emission and a Single-Zone Engine Model Development with Inedible Neem and Waste Vegetable Oil Biodiesel Blend (B10). *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2021. V. 22. No. 1. DOI:10.1007/s10973-016-5864-1
 13. Singh H., Sharma V. S., Dogra M. Exploration of graphene assisted vegetables oil based minimum quantity lubrication for surface grinding of TI-6AL-4V-ELI. *Tribology International*. 2020. V. 144. pp. 106113. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv. 2020035349
 14. Zhang X. et al. Vegetable oil-based nanolubricants in machining: from physicochemical properties to application. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 36. No. 1. p. 76. DOI:10.1186/s10033-023-00895-5
 15. Yusupov Sh. T. Thermophysical and thermodynamic properties of vegetable oils and some of their solutions in a wide range of temperatures and pressures. 2012.
 16. Zhu X. et al. Prediction of liquid specific heat capacity of food lipids. *Journal of food science*. 2018. vol. 83. no. 4. p. 992–997.
 17. Fedorov A. V., Tambulatova E. V., Balanov P. E., Fedorov A. A., Krylov V. A. Applied thermophysical aspects in biotechnology: a textbook. St. Petersburg: ITMO University, 2024. 88 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Крылов Василий Александрович

Аспирант факультета факультета экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, vakrylov@itmo.ru

Волков Сергей Михайлович

К. х. н., старший научный сотрудник отдела исследования жиров ВНИИЖиров, 191119, Санкт-Петербург, ул. Чернышевского, 10, volkovsm@vniig.org

Баранов Игорь Владимирович

Д. т. н., профессор, директор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, ivbaranov@itmo.ru

Тамбулатова Екатерина Викторовна

К. т. н., декан факультета экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, evtambulatova@itmo.ru

Федоров Александр Валентинович

Д. т. н., доцент факультета биотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, ВНИИЖиров, 191119, Санкт-Петербург, ул. Чернышевского, 10, afedorov@itmo.ru

Information about authors

Krylov Vasily A.

Postgraduate student of the Faculty of Ecotechnologies of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, vakrylov@itmo.ru

Volkov Sergey M.

Ph. D., Senior researcher of the Department of Fat Research of All-Russian Research Institute of Fats, 191119, Russia, St. Petersburg, Chernyakhovskogo str. 10, volkovsm@vniig.org

Baranov Igor V.

D. Sc., Professor, Director of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, ivbaranov@itmo.ru

Tambulatova Ekaterina V.

Ph. D., Dean of the Faculty of Ecotechnologies of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, evtambulatova@itmo.ru

Fedorov Aleksandr V.

D. Sc., Associate professor of the Faculty of Biotechnology of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, Fat Research of All-Russian Research Institute of Fats, 191119, Russia, St. Petersburg, Chernyakhovskogo str. 10, afedorov@itmo.ru



Статья доступна по лицензии

Creative Commons «Attribution-NonCommercial»