

УДК 51–72; 665.1/3

Уравнение состояния и плотность смеси сверхкритического диоксида углерода с растительными маслами

Канд. физ.-мат. наук А. С. СТАРКОВ¹, канд. техн. наук Г. Е. МЕЛЬНИК²,
К. А. СТАРКОВ², А. А. ФЕДОРОВ¹

¹Университет ИТМО

²Всероссийский научно-исследовательский институт жиров

E-mail: starkovalexandr@itmo.ru

Рассмотрено нахождение уравнения, связывающего объем, температуру и давление для газов, флюидов и жидкостей, которое является фундаментальным в теплофизике. В работе использовалось уравнение Ван-дер-Ваальса, содержащее два параметра — A и B . Параметр A характеризует силу, с которой приповерхностный слой молекул оттягивается от стенки ближайшим к нему слоем, а параметр B — суммарный объем молекул. Для более точного описания в уравнение состояния добавлено вспомогательное слагаемое — множитель, содержащий параметр C , величина которого определяется энергией взаимодействия молекул. Важным свойством предлагаемого уравнения является возможность определять параметры A , B и C для смеси по их значениям для компонент смеси. Выведено уравнение для плотности растворов сверхкритического диоксида углерода (СКДУ) в растительных маслах.

Ключевые слова: плотность, уравнение Ван-дер-Ваальса, формула смеси, зависимость от давления и температуры, сверхкритический диоксид углерода, растительные масла.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 06.10.2021, принята к печати 15.11.2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-66-72

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Старков А. С., Мельник Г. Е., Старков К. А., Федоров А. А. Уравнение состояния и плотность смеси сверхкритического диоксида углерода с растительными маслами // Вестник Международной академии холода. 2021. № 4. С. 66–72.

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-66-72

The equation of state and the density for the mixture of supercritical carbon dioxide with vegetable oils

Ph. D. A. S. STARKOV¹, Ph. D. G. E. MELNIK², K. A. STARKOV², A. A. FEDOROV¹

¹ITMO University

²All-Russian Research Institute of Fats

E-mail: starkovalexandr@itmo.ru

The publication considers the finding of an equation connecting volume, temperature, and pressure for gases, fluids, and liquids, which is fundamental in thermal physics. We used the Van-der-Waals equation containing two parameters, A and B . Parameter A characterizes the force with which the near-surface layer of molecules is pulled from the wall by the layer nearest to it, and parameter B is the total volume of molecules. For a more accurate description, an auxiliary summand has been added to the equation of state — a factor containing the parameter C , the value of which is determined by the interaction energy of molecules. An important property of the proposed equation is the ability to determine the parameters A , B , and C for a mixture from their values for the components of the mixture. Difficulties are known when trying to obtain a formula for the density of solutions of supercritical carbon dioxide (SCDC) in vegetable oils. The authors have derived an equation for the density of supercritical carbon dioxide solutions in vegetable oils.

Keywords: density, Van der Waals equation, mixture formula, pressure and temperature dependency, supercritical carbon dioxide, vegetable oils.

Article info:

Received 06/10/2021, accepted 15/11/2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-66-72

Article in Russian

For citation:

Starkov A. S., Melnik G. E., Starkov K. A., Fedorov A. A. The equation of state and the density for the mixture of supercritical carbon dioxide with vegetable oils. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. No 4. p.66–72. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-66-72

Введение

Интерес к применению сверхкритических флюидов диоксида углерода в технике наблюдается достаточно давно. К примеру, в процессах экстракции этому веществу может быть отдано предпочтение, поскольку применяется нетоксичный растворитель, безопасный для окружающей среды. Экстракты, полученные с помощью сверхкритических флюидов диоксида углерода — это хорошая основа для новых фармацевтических продуктов и ингредиентов в функциональных продуктах питания. Важно, что сверхкритический флюид диоксида углерода позволяет извлекать ряд веществ, которые практически не извлекаются традиционными органическими растворителями. Однако, наряду с достоинствами имеются и недостатки. Основное — это экономическая составляющая. Необходимость создания условий высокого давления при использовании флюидов требует применения специального дорогостоящего оборудования. Соответственно большими остаются эксплуатационные расходы. Трудности вызывает управление и автоматизация технологическим оборудованием из-за отсутствия универсальных физико-математических моделей процессов, которые опираются на объективные экспериментальные данные. Проведение экспериментов со сверхкритическим флюидом диоксида углерода, так же, как и промышленное его использование, сопряжено с не меньшими трудностями.

Сложности в реализации продвижения современных технологий с использованием сверхкритических диоксида углерода можно преодолеть только при более глубоком детальном изучении отдельных процессов. Приоритетом остаются фундаментальные исследования. Причем в сочетании с экономическим анализом, это может обеспечить положительный результат. Например, в работе [1] авторами предложена новая комбинация эмпирических уравнений состояния моделей равновесия и массопереноса на примере кокосового масла и сверхкритических флюидов диоксида углерода. Напомним, что уравнение состояния связывает между собой несколько термодинамических параметров системы, таких как температура, давление, объем, химический потенциал и др. Интересный подход к формированию уравнения состояния для исследуемых сред предложен в работе [2]. Представленные авторами этой работы соотношения оказались более точными в критической области.

Использование в пищевой, фармацевтической, нефтехимической и косметической промышленности технологий, основанных на использовании особых свойств сверхкритических флюидов, требует знания их физико-химических характеристик [3, 4]. К таковым относятся вязкость и плотность смеси (раствора), теплоемкость, коэффициент объемного расширения, растворимость.

Согласно теоретическим положениям, все физико-химические характеристики являются функциями плотности ρ и могут быть разложены в степенные ряды

по ρ (вириальные ряды). При больших значениях плотности эти ряды, как правило, расходятся и непригодны для проведения расчетов. Ввиду этого особую значимость представляют формулы, описывающие плотность в широком диапазоне давлений и температур с высокой точностью.

При описании зависимости плотности растительных масел от температуры и давления никаких трудностей не возникает. Например, простая полиномиальная зависимость воспроизводит экспериментальные результаты для масла какао с погрешностью менее 0,5% в диапазоне температур от 313 до 353 К при давлениях от 0,1 до 25 МПа [5]. Сложности появляются при попытке получить формулу для плотности растворов сверхкритического диоксида углерода (СКДУ) в растительных маслах. В работе [6] приведено сравнение трех уравнений состояния для диоксида углерода. Наименьшая ошибка при больших давлениях достигается при использовании уравнения Ван-дер-Ваальса. Но и для него погрешность монотонно увеличивается при повышении давления и достигает 11% при 100 МПа. Вследствие этого для плотности диоксида углерода приходится использовать табличные данные [7]. Это существенно затрудняет получение аналитических выражений для физических характеристик растворов диоксида углерода. Кроме того, заметная ошибка при определении плотности диоксида углерода неизбежно ведет к большой погрешности при определении свойств плотности раствора СКДУ в растительном масле.

Для нахождения плотности смеси предложено множество уравнений, которые носят полуэмпирический характер и содержат немало подгоночных параметров, позволяющих аппроксимировать экспериментально полученные зависимости с хорошей точностью. Так, в работе [8] рассмотрено 13 уравнений для плотности смеси и погрешность 12 из них не превышает 2%. Интересно, что аппроксимация производится совершенно разными функциями: многочленами, радикалами, экспонентами, рациональными дробями. Тем не менее, точность у большинства приближений примерно одинаковая. Недостатком указанных аппроксимаций является то, что они не обоснованы с точки зрения физики и, следовательно, применимы только для определённых классов веществ. Ввиду этого значительный интерес представляет получение физически обоснованной формулы для плотности, параметры которой могут быть вычислены для смеси произвольного числа компонент. Нахождение такой формулы и является основной целью настоящей работы.

Уравнение Ван-дер-Ваальса и его модификации

Основополагающим уравнением состояния идеального газа является уравнение Клайперона–Менделеева, которое для одного моля газа имеет вид $PV = RT$. Здесь P — давление (Па); V — молярный объем ($\text{м}^3/\text{моль}$); T — абсолютная температура (К); R — универсальная газовая постоянная ($R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$). Идея Ван-дер-Вааль-

са заключалась в том, чтобы скорректировать это уравнение, учтя конечный размер молекул и силы взаимодействия между ними. Первый момент учитывается заменой физического объема V на $V - B$, где B — суммарный объем молекул. Второй момент учитывается добавлением к давлению слагаемого, которое учитывает силу взаимодействия молекул. Эта сила пропорциональна квадрату концентрации молекул в приповерхностном слое или обратно пропорциональна квадрату молярного объема. В результате получаем уравнение Ван-дер-Ваальса для неидеального газа

$$\left(P + \frac{A}{V^2}\right)(V - B) = RT. \quad (1)$$

Уравнение (1) дает слишком большую погрешность при описании некоторых веществ, поэтому было предложено множество его модификаций (например, таблица 1.2 в работе [9]). Значительная часть предложенных поправок к уравнению уточняет слагаемое, описывающее взаимодействие молекул. Дитеричи полагал, что число притягиваемых молекул, расположенных в поверхностном слое, следует считать пропорциональным поверхностной, а не объемной плотности. В результате $\frac{A}{V^2}$ заменялось на $\frac{A}{V^{5/3}}$.

Редлих и Квонг предложили заменить V^2 на $\sqrt{TV}(V + B)$ [10], а Пенг и Робинсон на $V^2 + 2VB - B^2$ [11]. Значительно меньше поправок относятся к коэффициенту B . Больцман предложил дополнить этот коэффициент слагаемым $\frac{17B^2}{32V}$. Еще меньше поправок связано с правой частью уравнения (1). Укажем только на уравнение Лоренца [9]:

$$\left(P + \frac{A}{V^2}\right)V = RT\left(1 + \frac{B}{V}\right). \quad (2)$$

Понятно, что для описания жидкостей, когда объем близок к минимальному B , это уравнение не подходит.

Перейдем к выводу искомого уравнения состояния. Следуя идеям Ван-дер-Ваальса, введем еще один множитель в уравнение (1). Взаимодействие молекул влияет не только на давление, но и на энергию системы. Эта энергия входит в правую часть уравнения (1). Напомним, что универсальная газовая постоянная R численно равна работе расширения одного моля идеального газа в изобарном процессе при увеличении температуры на 1 К. Так как работа для реальных газов зависит от силы их взаимодействия, то константу R следует домножить на некоторый множитель, который учитывает изменение энергии системы, вызванное взаимодействием молекул. Это изменение пропорционально концентрации молекул, т. е. обратно пропорционально молярному объему. Таким образом, приходим к естественному обобщению уравнения Ван-дер-Ваальса

$$\left(P + \frac{A}{V^2}\right)(V - B) = RT\left(1 + \frac{C}{V}\right). \quad (3)$$

Левая часть уравнения (3) совпадает с левой частью уравнения Ван-дер-Ваальса (1), а правая — с правой частью уравнения Лоренца (2).

Наряду с уравнением (3), можно применять и следующий вариант уравнения Пенга–Робинсона:

$$\left(P + \frac{A}{V^2 + 2VB - B^2}\right)(V - B) = RT\left(1 + \frac{C}{V}\right);$$

$$P = \frac{-A}{A^2 + 2VB - B^2} + \frac{RT}{V - B} + \frac{CRT}{V(V - B)}. \quad (4)$$

В дальнейшем ограничимся исследованием уравнения (3). Отметим, что уравнение Пенга–Робинсона позволяет увеличить точность описания газов в среднем на 20–30% по сравнению с уравнением Ван-дер-Ваальса [11].

Эквивалентное уравнение (3) было получено в [12] при модернизации уравнения Ван-дер-Ваальса. Приведем альтернативный вывод уравнения (3), основываясь на идеях этой работы. Точно такие же рассуждения, основанные на уравнении Пенга–Робинсона, приводят к уравнению (4). В предположении, что зависимость от температуры есть только в выражении RT , а к давлению добавлена добавка $\frac{A}{V^2}$, из термодинамических соотношений в работе [4] была выведена формула для сжимаемости

$$Z = \frac{PV}{RT};$$

$$Z = f(V) - \frac{A}{VRT}. \quad (5)$$

Здесь $f(V)$ — некоторая функция от объема. И модернизация уравнения (1) заключается в подборе такой функции $f(V)$, которая наилучшим образом удовлетворяет экспериментальным данным. Эта функция должна удовлетворять двум естественным условиям. Во-первых, она должна стремиться к 1 при $V \rightarrow \infty$. Это требование означает, что при $V \rightarrow \infty$ свойства газа должны приближаться к свойствам идеального газа. Во-вторых, эта функция должна иметь особенность при $V = B$. Таких функций бесконечно много, но самые простые могут быть найдены в классе дробно-линейных функций. При $f(V) = \frac{V}{V - B}$ получаем уравнение Ван-дер-Ваальса. Но наиболее общей зависимостью дробно-линейных функций, удовлетворяющих двум вышеперечисленным условиям, является следующая $f(V) = \frac{V + C}{V - B}$. Эта зависимость содержит дополнительный параметр C и приводит к уравнению состояния (3).

Наличие третьего параметра C в уравнении (3) приводит к существенному увеличению точности описания свойств газов и жидкостей.

Так для сверхкритического диоксида углерода среднеквадратичное отклонение σ_z для сжимаемости в диапазоне температур от 220 до 1000 К и давлений от 0,1 до 100 МПа равно 0,034. При этом плотность меняется от 5 до 1250 кг/м³.

Отметим, что еще одним преимуществом уравнения (3) является возможность его обобщения для смеси газов или жидкостей. Этот вопрос рассмотрим в следующем разделе.

Уравнение состояния для смеси газов или жидкостей

Пусть имеется смесь из n компонент, поведение каждой из которых задается уравнением (3) с постоянными

A_i , B_i и C_i для компоненты с номером $i = 1, 2, \dots, n$. Для описания поведения смеси нужно определить ее параметры A , B и C . Для смеси двух газов формулы для определения параметров A и B смеси получены еще Ван-дер-Ваальсом [6] (формулы 2.5 и 2.6 гл. 4) и имеют вид

$$A = A_1x_1^2 + 2A_{12}x_1x_2 + A_2x_2^2; \quad (6a)$$

$$B = B_1x_1^2 + 2B_{12}x_1x_2 + B_2x_2^2; \quad (6b)$$

$$A_{12} = \sqrt{A_1A_2}; \quad B_{12} = \frac{1}{2}(\sqrt[3]{B_1} + \sqrt[3]{B_2}). \quad (6c)$$

Величины x_1 , x_2 — молярные доли компонент. Коэффициенты A_{12} и B_{12} являются постоянными, характеризующими столкновения между разнородными молекулами. Если экспериментальные данные по величине этих постоянных отсутствуют, то они могут быть грубо оценены с помощью эмпирических соотношений [6].

Обсудим формулы Ван-дер-Ваальса для смеси (6a, 6b, 6c). Если некоторая величина является аддитивной, то ее значение X для смеси компонент по известным значениям X_i для отдельной компоненты находится по формуле:

$$X = \sum_{i=1}^n x_i X_i. \quad (7)$$

Такой величиной является, например, концентрация молекул. Так как коэффициент A пропорционален квадрату концентрации, то для нахождения A , в случае произвольного числа компонент в смеси, имеем формулу:

$$A = \sum_{i=1}^n x_i^2 A_i + 2 \sum_{i < j} x_i x_j \sqrt{A_i A_j}. \quad (8)$$

Эта формула справедлива, если коэффициент пропорциональности одинаков для всех компонент смеси. Если же он разный, то во второй сумме (8) нужно заменить $\sqrt{A_i A_j}$ на экспериментально определяемый коэффициент A_{ij} . Сравнение формул (6) и (8) показывает, что формула (8) — есть обобщение формулы (6), на случай произвольного числа компонент. Разным является только происхождение формул. Эмпирический характер соотношения (6c) показывает, что коэффициент пропорциональности величины A квадрату концентрации молекул для многих веществ один и тот же.

Перейдем к формулам для коэффициента B . Соотношение (6c) не удовлетворяет важному условию теории смесей. Для трехкомпонентной смеси коэффициент B , определяемый соотношениями (6c), зависит от порядка смешения компонент. Если вначале определить коэффициент B для смеси компонент 1 и 2, а затем добавить компоненту 3, то результат будет отличаться от коэффициента B , полученного для смеси компонент 2 и 3, к которой добавили компоненту 1. Ввиду этого, формулу Ван-дер-Ваальса (6c) для коэффициента B следует заменить на физически обоснованную. В работе [13] использовано следующее правило для коэффициента B двухкомпонентной смеси $B = B_1x_1^2 + (B_1 + B_2)x_1x_2 + B_2x_2^2$.

Но и это правило не удовлетворяет выше сформулированному условию. Ввиду этого для нахождения B воспользуемся физическим смыслом коэффициента B_i как минимального объема i -й компоненты при бесконеч-

но большом давлении. Если считать смешение механическим процессом, то для смеси минимальный объем есть сумма минимальных составляющих объемов:

$$B = \sum_{i=1}^n x_i B_i. \quad (9)$$

Соотношения (8) и (9) называются правилами Лоренца–Бергло.

Перейдем к определению третьего коэффициента C в уравнении состояния. Этот коэффициент пропорционален концентрации молекул. Предполагая, что этот коэффициент пропорциональности является одинаковым для всех компонент, то для C получаем следующее равенство:

$$C = \sum_{i=1}^n x_i C_i. \quad (10)$$

Таким образом, коэффициент C для смеси определяется по тем же простым правилам взвешенного среднего, что и коэффициент B . Полученные формулы (8)–(10) позволяют выписать уравнение состояния (3) для смеси произвольного числа компонент.

Обсуждения и результаты

Выпишем вначале некоторые физические величины, которые получены из уравнения (3). Начнем с коэффициента сжимаемости:

$$Z = \frac{V+C}{V-B} + \frac{A}{VRT}. \quad (11)$$

Для нахождения коэффициента объемного расширения β

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T}, \quad (12)$$

запишем уравнение (3) в полиномиальном виде:

$$V^3 - \left(B + \frac{RT}{P} \right) V^2 + \frac{A-RTC}{P} V - \frac{AB}{P} = 0. \quad (13)$$

Отсюда находим производную от V по T

$$\frac{\partial V}{\partial T} = \frac{RV(V-C)}{3PV^2 - (BP+RT)V + (A-RTC)}. \quad (14)$$

В соответствии с формулой (14) для нахождения β имеем равенство:

$$\beta = \frac{-R(V-C)}{3PV^2 - (BP+RT)V + (A-RTC)}. \quad (15)$$

Предлагаемая формула, из-за своей структуры, должна иметь более широкий диапазон применимости по температуре и давлению.

Одним из существенных недостатков уравнения Ван-дер-Ваальса является зависимость коэффициента A от температуры. В строгой теории зависимость $A(T)$ задается интегралом по расстоянию, содержащим потенциальную функцию (формула (5.9) в [14]). Температура входит в указанный интеграл в соответствии с распределением Больцмана. Несмотря на то, что явный вид подынтегральной функции неизвестен, зависимость $A(T)$ находится по теореме о среднем и записывается в виде

$$A(T) = A_0 \exp\left(\frac{-A_1}{kT}\right). \quad (16)$$

Здесь A_0 и A_1 — некоторые коэффициенты, не зависящие от температуры. Поскольку коэффициент C определяется аналогичным образом, то и его зависимость от температуры должна быть точно такой же

$$C(T) = C_0 \exp\left(\frac{-C_1}{kT}\right). \quad (17)$$

К сожалению, строгих теорий для температурной зависимости коэффициента B авторам неизвестно. Но зависимость этого коэффициента от температуры значительно слабее, чем для коэффициента A , поэтому ею в первом приближении можно пренебречь. В результате получаем пяти параметрическое (A_0 , A_1 , B , C_0 , C_1) уравнение состояния (3), (16), (17).

При описании диоксида углерода использование всех 5 параметров позволяет достичь высокой точности приближения экспериментальных данных.

Для жидкостей изменение объема с повышением давления значительно меньше, чем для газов. Это позволяет написать приближенное уравнение состояния для жидкостей в виде

$$(P + \pi)(V - B) = \tilde{R}T, \quad (18)$$

где $\pi = \frac{A}{B^2}$ есть внутреннее давление [11], а $\tilde{R} = R\left(1 + \frac{C}{B}\right)$.

Из них вытекает следующее выражение для плотности $\rho = \frac{1}{V}$:

$$\rho = \frac{P + \pi}{\tilde{R}T + B(P + \pi)}. \quad (19)$$

Точное же уравнение, вытекающее из (3), имеет вид

$$P = RT\rho \frac{1 + C\rho}{1 - B\rho} - A\rho^2. \quad (20)$$

Для проверки предложенного уравнения состояния было проведено сравнение с экспериментальными данными по плотности подсолнечного масла, приведенными в [15]. Погрешность формулы (3) оказалась весьма малой и не превосходила 4% для температур от 283 до 363 К и для давлений от 0,1 до 45 МПа.

При малых давлениях и малых температурах можно использовать линейное приближение для зависимости плотности:

$$\rho(P, T) = \rho(0, T_0) + (T - T_0) \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_{P=P_0, T=T_0} + (P - P_0) \left. \frac{\partial \rho}{\partial P} \right|_{P=P_0, T=T_0}. \quad (21)$$

Результаты расчетов, выполненных по соотношению (21), хорошо согласуются с экспериментальными данными работы [15], вплоть до давлений 45 МПа.

Выводы

Вопрос о нахождении уравнения, связывающего объем, температуру и давление для газов, флюидов и жидкостей является фундаментальным в теплофизике.

В данной работе использовалось уравнение Ван-дер-Ваальса, содержащее два параметра — A и B . Несмотря на то, что это уравнение было получено эмпирическим путем, параметры этого уравнения имеют ясный физический смысл. Параметр A характеризует силу, с которой приповерхностный слой молекул оттягивается от стенки ближайшим к нему слоем, а параметр B есть суммарный объем молекул. С точки зрения теории катастроф [16] уравнение Ван-дер-Ваальса качественно правильно описывает особенности поведения газов и жидкостей. Для точного описания в него следует добавить вспомогательные слагаемые. Поскольку это уравнение кубическое относительно объема, то необходимо добавить минимум один параметр. Эта идея реализована в данной работе, в которой уравнение Ван-дер-Ваальса было дополнено множителем, содержащим вспомогательный параметр C . Аналогичный множитель входил в уравнение состояния Лоренца. Величина C определяется энергией взаимодействия молекул. Важным свойством предлагаемого уравнения является возможность определять параметры A , B и C для смеси по их значениям для компонент смеси.

Для нахождения параметров A и B в уравнении Ван-дер-Ваальса для смеси имеется несколько формул. Для уравнения (3), имеющего те же коэффициенты, предложено использовать правило Лоренца–Бертло, как наиболее соответствующее физическому смыслу этих величин. Формула для нового параметра C смеси выведена из его пропорциональности концентрации молекул.

Для более точного описания газов и жидкостей коэффициенты A , B и C можно считать зависящими от температуры. Предлагаемая зависимость этих коэффициентов от температуры выбрана на основании распределения Больцмана.

Таким образом, при получении формул (3) и (14) использовались только строгие физические рассуждения о минимальном объеме, силе и энергии взаимодействия молекул. Это отличает предложенное уравнение состояния от множества других, где коэффициенты вводятся без какого-либо обоснования. Физическая обоснованность данного уравнения приводит к снижению отклонений теоретических значений от экспериментальных данных. Еще одним достоинством уравнения (3) является возможность его дальнейшей модернизации.

Литература

References

1. E. Torres-Ramón, C. M. García-Rodríguez, K. H. Estévez-Sánchez, I. I. Ruiz-López, G. C. Rodríguez-Jimenes, G. Romero de la Vega, M. A. García-Alvarado. Optimization of a coconut oil extraction process with supercritical CO₂ considering economical and thermal variables // *The Journal of Supercritical Fluids*. April 2021. V. 170. 105160. DOI: 10.1016/j.supflu.2020.105160
2. Kim Y. Equation of state for carbon dioxide // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2007. 21. P. 799–803. DOI:10.1007/BF02916358
3. Мельник Г. Е., Волков С. М., Федоров А. В. Сверхкритический диоксид углерода: возможности применения в производстве растительного масла // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2016. № 1 (27). С. 3–14.
4. Мельник Г. Е., Волков С. М. Применение технологии экстрагирования сверхкритическим диоксидом углерода для извлечения подсолнечного масла // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров*. 2016. № 2. С. 40–45.
5. Меретуков З. А., Кошевой Е. П., Косачев В. С. Плотность и вязкость растворов двуокиси углерода в растительных маслах при прессовании масляных материалов // *Новые технологии*. 2011. № 4. С. 62–65.
6. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. / Пер. с англ. под ред. Е. В. Ступоченко. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 929 с.
7. Алтунин В. В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. М.: Издательство стандартов, 1975. 546 с.
8. Spencer C. F, Danner R. P. Improved equation for prediction of saturated liquid density // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1972. V. 17, No 2. P. 236–241.
9. Рид Р., Праунсниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие / Пер. с англ. под ред. Б. И. Соколова. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1982. 592 с.
10. Уэйлес С. Фазовые равновесия в химической технологии: в 2 ч. / пер. с англ. М.: Мир, 1989. Ч. 1. 304 с.; Ч. 2. 360 с.
11. Redlich O., Kwong J. N. S. On the thermodynamics of solutions: V: An equation of state. Fugacities of gaseous solutions // *Chem. review*. 1949. V. 44, No 1. P. 233–244.
12. Peng D.-Y., Robinson D. B. A new two-constant equation of state // *Ind. eng. chem. fundamen.* 1976. V. 15. P. 59–64.
13. Каплун А. Б., Мешалкин А. Б. О термодинамическом обосновании формы единого уравнения состояния жидкости и газа. // *Теплофизика высоких температур*. 2003. Т. 41, № 3. С. 373–380.
14. Меретуков З. А., Кошевой Е. П. Физико-химическая механика экструзионной подготовки структуры растительных материалов к экстрагированию двуокисью углерода. углерода: монография. К.: Издательский дом ЮГ, 2011. 130 с.
15. Де-Бур Я. Введение в молекулярную физику и термодинамику. М.: Изд-во иностр. литературы, 1962. 277 с.
16. Freitas S. V. D, Silva F. A., Pastoriza-Gallego M. J., Piñeiro M. M., Lima A. S., Coutinho J. A. P. Measurement and prediction of densities of vegetable oils at pressures up to 45 MPa. // *Journal of Chemical and Engineering Data*. 2013. V. 58. P. 3046–3053.
17. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. М.: Мир, 1980. 607 с.
1. E. Torres-Ramón, C. M. García-Rodríguez, K. H. Estévez-Sánchez, I. I. Ruiz-López, G. C. Rodríguez-Jimenes, G. Romero de la Vega, M. A. García-Alvarado. Optimization of a coconut oil extraction process with supercritical CO₂ considering economical and thermal variables. *The Journal of Supercritical Fluids*. April 2021. V. 170. 105160. DOI: 10.1016/j.supflu.2020.105160
2. Kim Y. Equation of state for carbon dioxide. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2007. 21. P. 799–803. DOI:10.1007/BF02916358
3. Melnik G. E., Volkov S. M., Fedorov A. V. Supercritical carbon dioxide: possibilities of application in the production of vegetable oil. *Scientific Journal NRU ITMO. Processes and Food Production Equipment*. 2016. No. 1 (27). pp. 3–14. (in Russian)
4. Melnik G. E., Volkov S. M. Application of supercritical carbon dioxide extraction technology for sunflower oil extraction. *Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Fats*. 2016. No. 2. pp. 40–45. (in Russian)
5. Meretukov Z. A., Koshevoy E. P., Kosachev V. S. Density and viscosity of carbon dioxide solutions in vegetable oils during pressing of oilseed materials. *New technologies*. 2011. No. 4. pp. 62–65. (in Russian)
6. Hirschfelder J., Curtiss C., Byrd R. Molecular theory of gases and liquids. / Translated from English. edited by E. V. Stupochenko. Moscow, Publishing House of Foreign lit., 1961. 929 p. (in Russian)
7. Altunin V. V. Thermophysical properties of carbon dioxide. Moscow: Publishing House of Standards, 1975. 546 p. (in Russian)
8. Spencer C. F, Danner R. P. Improved equation for prediction of saturated liquid density. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1972. V. 17, No 2. P. 236–241.
9. Wayles S. Phase equilibria in chemical technology: in 2 hours / trans. from English M.: Mir, 1989. Part 1. 304 p.; Part 2. 360 p. (in Russian)
10. Reed, R., Prausnitz, J., Sherwood, T. Properties of gases and liquids: Reference manual / Translated from English. edited by B. I. Sokolov. 3rd ed., reprint. and additional L.: Chemistry, 1982. 592 p. (in Russian)
11. Redlich O., Kwong J. N. S. On the thermodynamics of solutions: V: An equation of state. Fugacities of gaseous solutions. *Chem. review*. 1949. V. 44, No 1. P. 233–244.
12. Peng D.-Y., Robinson D. B. A new two-constant equation of state. *Ind. eng. chem. fundamen.* 1976. V. 15. P. 59–64.
13. Kaplun A. B., Meshalkin A. B. On the thermodynamic justification of the form of a single equation of state of liquid and gas. *Thermophysics of high temperatures*. 2003. Vol. 41, No. 3. pp. 373–380. (in Russian)
14. Meretukov Z. A., Koshevoy E. P. Physico-chemical mechanics of extrusion preparation of the structure of plant materials for carbon dioxide extraction. carbon: monograph. K.: Publishing house YUG, 2011. 130 p. (in Russian)
15. De-Bur Ya. Introduction to molecular physics and thermodynamics. Moscow: Publishing House of Foreign Languages. literature, 1962. 277 p. (in Russian)
16. Freitas S. V. D, Silva F. A., Pastoriza-Gallego M. J., Piñeiro M. M., Lima A. S., Coutinho J. A. P. Measurement and prediction of densities of vegetable oils at pressures up to 45 MPa. *Journal of Chemical and Engineering Data*. 2013. V. 58. P. 3046–3053.
17. Poston T., Stewart I. The theory of catastrophes and its applications. Moscow: Mir, 1980. 607 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Старков Александр Сергеевич

К. ф.-м. н., доцент факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, starkovalexandr@itmo.ru, ORCID ID 0000-0001-5744-2481

Мельник Геннадий Ефимович

К. т. н., ведущий научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института жиров, 191119, Санкт-Петербург, ул. Чернышевского, 10, gmelnik478@gmail.com, ORCID ID 0000-0002-0651-0031

Старков Константин Александрович

Ведущий специалист Всероссийского научно-исследовательского института жиров, 191119, Санкт-Петербург, ул. Чернышевского, 10, starnu@rambler.ru, ORCID ID 0000-0001-9832-7463

Федоров Алексей Александрович

Аспирант факультета биотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, alex2829735@yandex.ru, ORCID ID 0000-0003-3860-7708

Information about authors

Starkov Alexander S.

Ph. D., Associate Professor of Faculty of Control Systems and Robotics of ITMO University, Russia 197101, St. Petersburg, Kronverksky Pr. 49, bldg. A, starkovalexandr@itmo.ru, ORCID ID 0000-0001-5744-2481

Melnik Gennady E.

Ph. D., Leading researcher of the All-Russian Research Institute of Fats, 191119, St. Petersburg, Chernyakhovsky str., 10, gmelnik478@gmail.com, ORCID ID 0000-0002-0651-0031

Starkov Konstantin A.

Leading Specialist of the All-Russian Research Institute of Fats, 191119, St. Petersburg, Chernyakhovsky str., 10, starnu@rambler.ru, ORCID ID 0000-0001-9832-7463

Fedorov Alexey A.

Graduate student of the Faculty of Biotechnology of ITMO University, Russia, 191002, St. Petersburg, Lomonosova St. 9, alex2829735@yandex.ru, ORCID ID 0000-0003-3860-7708



АГРОРУСЬ

31 Международная агропромышленная выставка-ярмарка
АГРОРУСЬ-2022

**Выставка «АГРОРУСЬ» проводится
31 августа – 4 сентября 2022 г.
Ярмарка региональных продуктов «АГРОРУСЬ»
26 августа – 4 сентября 2022 г.**

Проект АГРОРУСЬ проводится с 1991 года – ровесник современной России:

- единственный агропромышленный форум, представляющий интересы: крестьянских, фермерских и личных подсобных хозяйств, сельских кооперативов, садоводов и огородников, специалистов перерабатывающих предприятий, потребителей сельскохозяйственной продукции;
- ведущая выставочная площадка по вопросам стимулирования и развития всех малых форм хозяйствования и кооперации в АПК России, направленная на обеспечение продовольственной безопасности и поддержку экспорториентированных российских сельхозтоваропроизводителей.

ВЫСТАВКА. РАЗДЕЛЫ:

- ✓ Сельскохозяйственная техника
- ✓ Оборудование для АПК
- ✓ Растениеводство сельскохозяйственных культур
- ✓ Средства защиты растений. Агрохимия
- ✓ Животноводство. Корма и комбикорма. Ветеринария
- ✓ Продукты питания
- ✓ Напитки (Кухня регионов «От поля до прилавка»)
- ✓ Услуги для АПК. Научное обеспечение. Управление

<http://agrorus.expoforum.ru/>

Организатор выставки-ярмарки:

Министерство сельского хозяйства РФ,
при официальной поддержке Правительств
Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Контакты:

Тел./факс: +7 (812) 240-40-40, доб.2235
E-mail: e.gabuchiya@expoforum.ru,

Место проведения:

КВЦ «Экспофорум»
Петербургское шоссе 64, корпус 1,
павильоны F, G