

Гидродинамическая модель вязкости смеси сверхкритического диоксида углерода с растительными маслами в капилляре

Канд. техн. наук **Г.Е. Мельник¹**, **Д.А. Лисицын¹**, канд. техн. наук **А.С. Старков²**,
д-р техн. наук **А.В. Федоров²**, д-р техн. наук **Ю.А. Власов³**, **К.А. Старков²**,
А.А. Федоров², afedorov@corp.ifmo.ru

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт жиров
191119, Россия, Санкт-Петербург, ул. Черныховского, 10*

² *Университет ИТМО
191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

³ *Флоридский Международный Университет
10555, США, Майами*

Рассмотрена гидродинамическая модель движения двухслойной жидкости в капилляре кругового сечения. Предполагается, что на границе жидкостей возникает тонкий переходный слой, который приводит к проскальзыванию слоев друг относительно друга. Вязкость переходного слоя считается функцией давления и задается по формуле Аррениуса с некоторыми изменениями, то есть при увеличении давления вязкость уменьшается экспоненциально. Предложенная модель используется для нахождения вязкости смеси, состоящей из двух жидкостей. Выведена формула для смеси, которая отличается от ранее известных. В качестве примера рассмотрена смесь сверхкритического диоксида углерода и подсолнечного масла.

Ключевые слова: математическое моделирование; модель движения двухслойной жидкости; капилляр; динамическая вязкость; формула смеси; гидродинамическая модель; зависимость от давления; сверхкритический диоксид углерода; растительные масла; подсолнечное масло.

DOI: 10.17586/2310-1164-2019-12-4-48-54

Hydrodynamic model for the viscosity of a mixture of supercritical carbon dioxide with vegetable oils in a capillary

Ph. D. **G.E. Melnik¹**, **Dmitry A. Lisitsyn¹**, Ph. D. **Alexander S. Starkov²**,
Ph. D. **Alexander V. Fedorov²**, Ph. D. **Yuriy A. Vlasov³**, **Constantin A. Starkov²**,
Alexey A. Fedorov², afedorov@corp.ifmo.ru

¹*All-Russian Scientific Research Institute of Fats
10, Chernyakhovskij str., St. Petersburg, 191119, Russia*

²*ITMO University
9, Lomonosov str., St. Petersburg, 191002, Russia*

³*Florida International University
10555, USA, Miami*

A hydrodynamic model for the motion of a two-layer fluid in a circular capillary is considered. It is assumed that a thin transition layer arises at the liquid boundary, which results in slippage of the layers relative to each other. The viscosity of the transition layer is considered a function of pressure and is specified by the Arrhenius formula with some changes, i.e., with increasing pressure the viscosity decreases exponentially. The proposed model is used to find the viscosity of a mixture for two liquids. A formula is derived for a mixture that differs from that previously known. A mixture of supercritical carbon dioxide and sunflower oil is considered as an example.

Keywords: math modeling; two-fluid system motion model; capillary; dynamic viscosity; mixture formula; hydrodynamic model; pressure dependence; supercritical carbon dioxide; vegetable oils; sunflower oil.

Введение

Потребности в растительном масле неуклонно растут как в нашей стране, так и во всем мире. Современные индустриальные комплексы производства и переработки масличного сырья в принципе в состоянии справиться с увеличением объемов выпуска продукции. Конечно, при обеспечении в достаточном количестве масличным материалом. Достаточно хорошо отработанные так называемые способы маслодобыывания успешно применяются в промышленности. Однако в условиях серьезной конкуренции преимущества получит тот производитель, который применяет более совершенные технологии.

К таким прогрессивным передовым технологиям, безусловно, относятся технологии извлечения растительных масел с применением сверхкритического диоксида углерода (флюида). По мнению ведущих

специалистов, в нашей стране и за рубежом у этих технологий большое будущее. Они позволяют получать из растительного сырья целевые экологически чистые компоненты, максимально сохраняющие свои нативные свойства. В опубликованных работах можно встретить и применение сверхкритической жидкостной экстракции в различных биологических системах [1, 2], где иные технологии не дают желаемого результата. В связи со сложностью получения экспериментальных данных при отдельных режимных параметрах, перспективным является направление математического моделирования процессов флюидной экстракции [3–5]. Появление новых сортов масличных культур вызывает некоторые проблемы при извлечении из них масла и уже есть попытки применения в этом случае флюидной экстракции. Интересной, по нашему мнению, является работа по изучению скорости извлечения масла из высокоолеиновых семян подсолнечника сверхкритической двуокисью углерода [6]. Можно отметить и применение сверхкритической экстракции в разработке технологии получения биодизеля. Особенно из вторичных ресурсов. Таким источником сырья может быть так называемое «отработанное» растительное масло. Авторы [7] достаточно подробно описывают преимущества применения флюидной экстракции в этой области. Большинство опубликованных работ посвящено экспериментальным исследованиям для применения в классических технологиях маслодобытывания, для нас самыми интересными были данные полученные авторами [6–8].

Основной задачей при теоретическом исследовании свойств смеси является нахождения ее усредненных (эффективных) физических характеристик по их известным значениям для отдельных компонент (фаз), входящих в смесь. Смесь можно рассматривать как однородную среду, если исследовать явления, характеризующиеся расстояниями, превышающими размер включений. Эту среду называют усредненной или эффективной. В силу практической важности нахождения свойств усредненной среды было разработано немало методов ее решения. Условно их можно разделить на математически строгие и приближенные. К первым методам относится метод усреднения периодических структур [9] и его частный случай – матричный метод усреднения [10]. Данные методы позволяют точно указать погрешность замены многофазной среды на эффективную с усредненными значениями параметров. К сожалению, строгие методы либо не позволяют получить явных выражений для физических характеристик смеси [9], либо имеют ограниченную область применимости [10]. Можно показать, что задача о течении жидкости в периодической слоистой среде не имеет стационарного решения при постоянном градиенте давления, а именно эта задача является основной при нахождении эффективных характеристик слоистой среды. Ввиду этого широкое распространение получили подходы к усреднению, основанные на простых физических соображениях. Помимо чисто вычислительных методов имеется широкий набор теоретических, полутеоретических и эмпирических формул для расчета вязкости смеси [11, 12], которые применимы при расчете конкретных жидкостей в узком диапазоне температур и давлений. Большинство этих формул имеет слабое теоретическое обоснование, а достижение точности происходит за счет некоторого набора подгоночных параметров. В связи с этим является актуальной задача получения физически обоснованной формулы для смеси. Для этого необходимо найти точное решение какой-либо гидродинамической задачи для потока двухфазной жидкости. Трудность решения задач гидродинамики позволяет находить явные формулы для течения только для малого набора геометрий фаз. В данной работе в качестве модельной рассматривается простейшее осесимметричное течение двухфазной жидкости в капилляре.

Вязкость двухфазной жидкости

1. Течение двухфазной жидкости в цилиндрическом канале

1.1. Уравнения и граничные условия для вязкой жидкости

Линеаризованное уравнение Навье–Стокса для вязкой несжимаемой жидкости в стационарном случае при малых числах Рейнольдса имеет вид

$$\eta \Delta V - \text{grad } p = 0. \quad (1)$$

Здесь V – вектор скоростей;

p – давление;

η – (динамическая) вязкость;

Δ – оператор Лапласа.

К уравнению (1) нужно еще добавить условие несжимаемости, которое записывается в виде

$$\operatorname{div} V = 0. \quad (2)$$

Введем цилиндрическую систему координат (ρ, z) и будем рассматривать уравнения (1) и (2) в неограниченном цилиндре $0 < \rho < R$ (капилляре). Течение в таком канале является осесимметричным, поэтому можно ограничиться только двумерной системой координат, исключив из рассмотрения полярный угол. Предполагается, что жидкость в исследуемом канале состоит из двух фаз, вязкости которых обозначим через η_1 и η_2 . Первая жидкость занимает внутреннюю часть капилляра, задаваемую неравенством $0 < \rho < R_1$, а вторая течет при $R_1 < \rho < R$. Жидкости считаются несмешивающимися, поэтому ширины потоков h_1 и $h_2 = R - R_2$ остаются неизменными. Предполагается, что на границе между жидкостями возникает тонкий (в пределе имеющий нулевую толщину) пограничный слой, вязкость которого равна η_3 , занимающий область $R_1 < \rho < R_2$. Наличие слоя приводит к появлению проскальзывания между слоями, а предполагаемая зависимость η_3 от давления приводит к аналогичной зависимости искомой эффективной вязкости η_{eff} . Обозначим через V_1 и V_2 относительные объемы жидкостей, $V_1 = R_1^2/R^2$, $V_2 = (R^2 - R_2^2)/R^2$. Нетрудно проверить, что если пренебречь толщиной переходного слоя $h_3 = R_2 - R_1$, то $V_1 + V_2 = 1$. Данное соотношение позволяет исключать из рассмотрения относительный объем второй жидкости и ограничиваться в формулах только одним относительным объемом V_1 . Основная цель работы – нахождение эффективной вязкости системы η_{eff} , как функции вязкостей η_1 , η_2 , η_3 и V_1 . Осесимметричное течение выбрано из условия достаточно простого нахождения распределения скоростей в цилиндрическом канале [13].

Для определения вязкости требуется неоднородность течения жидкости или давления, поэтому будем считать давление p линейно изменяющимся в направлении оси z

$$p = P_0 + P_1 z. \quad (3)$$

Постоянные p_0 и p_1 характеризуют среднее значение давления и его градиента. Величину p_1 будем считать отрицательной. В этом случае скорость течения направлена параллельно оси z .

Для однозначного определения неизвестных, выписанные уравнения (1–3) следует дополнить граничными условиями на стенках капилляра $\rho = R$ и на границах раздела жидкостей $\rho = R_{1,2}$. На поверхности капилляра потребуем выполнение стандартных условий прилипания [13]

$$V(\rho = R) = 0. \quad (4)$$

Можно показать, что в рассматриваемом случае, точно также как и при течении однофазной жидкости (течении Пуазейля) [13], будет отсутствовать только одна компонента скорости $V = (0, v_1)$, которая будет зависеть от радиуса ρ . Это рассуждение позволяет сократить число граничных условий. Вследствие отсутствия перемешивания различных жидкостей на их границе должны обращаться в ноль касательные к границе компоненты скорости, а компоненты тензора деформации должны быть равны между собой

$$\begin{aligned} v_1(\rho = R_1) = v_3(\rho = R_1) = 0, \quad v_2(\rho = R_2) = v_3(\rho = R_2) = 0 \\ \eta_1 \frac{dv_1}{dz} \Big|_{\rho = R_1} = \eta_3 \frac{dv_3}{dz} \Big|_{\rho = R_1}, \quad \eta_3 \frac{dv_3}{dz} \Big|_{\rho = R_2} = \eta_2 \frac{dv_2}{dz} \Big|_{\rho = R_2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Индексы в условиях уравнения (5) указывают на принадлежность определенной среде (индексы 1, 2 и 3).

1.2. Решение поставленной задачи

Решение дифференциальных уравнений (1–3) хорошо известно [13], поэтому будем отыскивать распределение скоростей в виде

$$v_1 = P_1 \left(\frac{\rho^2}{2\eta_1} + b_1 \right), \quad v_2 = P_1 \left(\frac{\rho^2}{2\eta_2} + a_2 \ln \rho + b_2 \right), \quad v_3 = P_1 \left(\frac{\rho^2}{2\eta_3} + a_3 \ln \rho + b_3 \right). \quad (6)$$

Здесь a_2, a_3 и b_1, b_2, b_3 произвольные постоянные. В выражение для v_1 не вошло логарифмическое слагаемое, которое имеет особенность при $\rho = 0$. Для нахождения неопределенных коэффициентов в (6) обратимся к условиям непрерывности (5) и условию прилипания (4). В результате подстановки (6) в (5) получаем систему алгебраических линейных уравнений относительно неизвестных a_2 и a_3

$$a_2 = a_3 = 0, \quad b_1 = \frac{R_1^2}{2} \left(\frac{1}{\eta_3} - \frac{1}{\eta_1} \right) + \frac{R_2^2}{2} \left(\frac{1}{\eta_2} - \frac{1}{\eta_3} \right) - \frac{R^2}{2\eta_2},$$

$$b_2 = -\frac{R^2}{2\eta_2}, \quad b_3 = \frac{R_2^2}{2} \left(\frac{1}{\eta_2} - \frac{1}{\eta_3} \right) - \frac{R^2}{2\eta_2}.$$

Найденные значения постоянных (7) позволяют выписать зависимость скорости от координаты

$$v_2 = \frac{p^2 - R^2}{2\eta_2}, \quad v_3 = \frac{p^2 - R_2^2}{2\eta_3} + \frac{R_2^2 - R^2}{2\eta_2}, \quad v_1 = \frac{p^2 - R_1^2}{2\eta_1} + \frac{R_2^2 - R^2}{2\eta_2} + \frac{R_1^2 - R_2^2}{2\eta_3}.$$

При $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3$ формулы (8) переходят в хорошо известные формулы для течения однофазной жидкости. Зависимость скорости от радиуса является параболической, как и в течении Пуазейля. Отличие от течения однофазной жидкости заключается только в наличии излома на границах фаз.

2. Усредненное значение вязкости в капилляре

Полученное в предыдущем разделе решение задачи о распределении скоростей будем использовать для нахождения η_{eff} всей системы. Для течения жидкости в однофазной среде с вязкостью η справедливо равенство (5)

$$\bar{v} = -\frac{R^2}{8\eta_{eff}} P_1.$$

Здесь и далее черта над величиной означает усреднение этой величины по ширине канала или его части

$$\bar{v} \equiv \frac{2}{R^2} \int_0^R v(p) p dp.$$

Положим равенство (9) в основу нахождения η_{eff} , а именно определим η_{eff} следующим образом

$$\eta_{eff} = -\frac{R^2}{8\bar{v}} P_1.$$

Средние значения скоростей легко вычисляются при интегрировании выражений (6) и имеют вид

$$\bar{v} = -\frac{p_1}{8R^2} \left(\frac{R_1^4}{\eta_1} + \frac{R_2^4 - R_1^4}{\eta_3} + \frac{R^4 - R_2^4}{\eta_2} \right).$$

В результате объединения формул (11) и (12) и использовании очевидного соотношения $\bar{v} = \bar{v}_1 + \bar{v}_2$ получаем искомую формулу

$$\eta_{eff} = \frac{1}{\frac{R_1^4}{\eta_1 R^4} + \frac{R_2^4 - R_1^4}{\eta_3 R^4} + \frac{R^4 - R_2^4}{\eta_2}}.$$

Устремим в формуле (13) R_2 к R_1 , т.е. устремим толщину переходного слоя к 0. При этом устремим к 0 также вязкость переходного слоя η_3 так, чтобы отношение $K = (R_2 - R_1)/(\eta_3 R)$ оставалось конечным. Тогда величины, стоящие в знаменателе формулы могут быть переписаны в терминах V_1 следующим образом

$$\eta_{eff} = \frac{1}{\frac{V_1^2}{\eta_1} + \frac{1 - V_1^2}{\eta_2}} + 4KV_1^{3/2}.$$

При проведении расчетов зависимость параметра K от давления P и температуры T задавалась в соответствии с теорией Аррениуса в виде [14]

$$K = A \exp\left[\frac{BP}{RT}\right].$$

Здесь A и B феноменологические постоянные;

R – газовая постоянная. Постоянная B называется активационный объем потока (flow activation volume) [11].

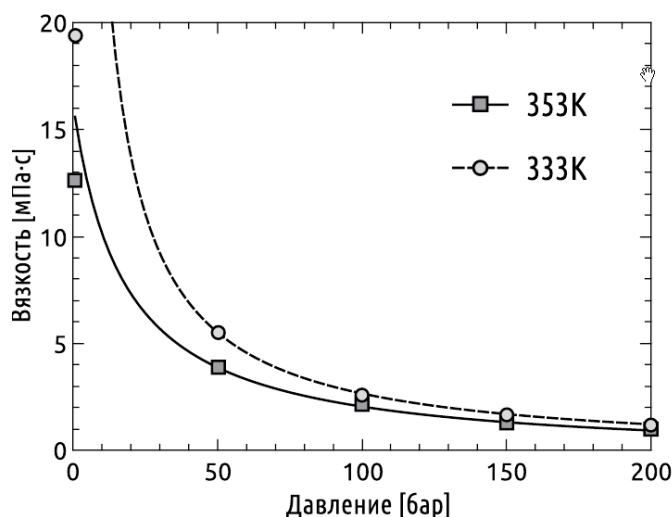


Рисунок – Зависимость вязкости от давления

Figure. Dependence of viscosity on pressure

Выводы

В исходные уравнения температура не входит, поэтому ее отсутствие в основной формуле (14) естественно. В то же время давление в уравнение Навье–Стокса входит, но эффективная вязкость от него не зависит. Значит, в данном приближении зависимость η_{eff} от давления определяется как зависимостями от давления вязкостей η_1 и η_2 , так и зависимостью от давления параметра K , характеризующего переходный слой. Вязкость переходного слоя в соответствии с зависимостью (15) уменьшается с ростом давления и возрастает при увеличении температуры.

В качестве проверки вышеописанной теории были проведены численные расчеты для зависимости вязкости смеси сверхкритического диоксида углерода и рапсового масла. Смеси диоксида углерода с растительными маслами широко используются в пищевой промышленности [15–17]. Значения для вязкости этих веществ были взяты из [18–21]. Результаты вычислений представлены на рисунке. Поведение вязкости смеси согласуется с поведением смеси сверхкритического углерода и масла какао [22] и экспериментами по соевому маслу [23].

Данная работа является только первым шагом в построении гидродинамической модели, описывающей свойства вязкости смеси двух жидкостей. Более точная модель может быть основана на модели сферических включений одной жидкости в другой, но и этот простой вариант может быть использован при исследовании вязкости двухфазной жидкости, текущей по капилляру.

Литература

1. Vidya P., Mohd M., Vishal L., Samreen F. Supercritical Fluid Extraction: Applications to Biological System. Research. *Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2015, V. 6, no. 4, pp. 371–378.
2. Casas L., Mantell C., Rodriguez M., Torres A., Macias F.A. Supercritical fluid extraction of bioactive compounds from sunflower leaves with carbon dioxide and water on a pilot plant scale. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2008, V. 45, pp. 37–42.
3. Cocero M.J., J. Garcia J. Mathematical model of supercritical extraction applied to oil seed extraction by CO₂ and saturated alcohol. *Journal of Supercritical Fluids*. 2001, no. 20, pp. 245–255.
4. Fiori L. Supercritical extraction of sunflower seed oil: Experimental data and model validation. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2009, V. 50, pp. 218–224.
5. King J.W., List G.R. *Supercritical Fluid Technology in Oil and Lipid Chemistry*. AOCS Press J.W., Illinois, 1996, p. 34.
6. Kiriamiti H.K., Rascol E., Marty A., Condoret J.S. Extraction rate of oil from high oleic sunflower seeds with supercritical carbon dioxide. *Chem. Eng. Process*. 2002, V. 41, pp. 711–718.
7. Rodrigues A.R., Paiva A., Marco Gomes da Silva, Simões P., Barreiros S. Continuous enzymatic production of biodiesel from virgin and waste sunflower oil in supercritical carbon dioxide. *Journal of Supercritical Fluids*. 2001, V. 20, pp. 245–255.
8. Дадашев М.Н., Кобелев К.Б., Чурсина О.А., Винокуров В.А., Филенко Д.Г. Исследование процесса сверхкритической экстракции ароматических веществ из возобновляемого растительного сырья // Хранение и переработка сельхозсырья. 2014. № 1. С. 29–32.

9. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах: математические задачи механики композиционных материалов. М.: Наука, 1984, 352 с.
10. Старков А.С., Старков И.А. Применение обобщенного матричного метода усреднения для расчета эффективных свойств тонких пленок мультиферроиков // Журнал экспериментальной теоретической физики. 2014. Т. 146. № 5. С. 980–989.
11. Grunberg L., Nissan A.H. Mixture law for viscosity. *Nature*. 1949. V. 164, no. 4175, P. 799.
12. Irving G.B. *Viscosity of binary liquid mixtures: the effictiveness of mixture equations*. NEL report no. 631. National Engineering Laboratory: East Kilbride, Glasgow, Scotland, 1977.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. Т. 6. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2006. 736 с.
14. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. М.: Химия, 1977. 440 с.
15. Orr F.M., Taber J.J. Use of carbon dioxide in enhanced oil recovery. *Science*. 1984, V. 224, no. 4649, pp. 563–569.
16. 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. С. 3–14.
17. Мельник Г.Е., Волков С.М. Применение технологии экстрагирования сверхкритическим диоксидом углерода для извлечения подсолнечного масла // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров. 2016. № 1–2. С. 40–45.
18. Каплун А.Б., Мешалкин А.Б. Единое уравнение для расчета коэффициента вязкости диоксида углерода // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. №. 21. С. 108–113.
19. Козлов А.Д., Мамонов Ю.В. и др. Диоксид углерода. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 220...1000 К и давлениях от соответствующих разреженному газу до 100 Мпа. Таблицы ССД ГСССД 110-87. М., Изд-во стандартов, 1988, 17 с.
20. Габитов Р.Р., Накипов Р.Р., Шамсетдинов Ф.Н., Усманов Р.А., Хфйруллин И.Х., Зарипов З.И. Переносные свойства растительных масел // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. №. 21. С. 25–27.
21. Максимук Ю.В., Антонова З.А., Фесько В.В., Курсевич В.Н. Вязкость и теплота сгорания дизельного биотоплива // Химия и технология топлив и масел. 2009. № 5. С. 27–30.
22. Меретуков З.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Плотность и вязкость растворов двуокиси углерода в растительных маслах при прессовании масличных материалов // Новые технологии. 2011. №. 4. С. 62–65.
23. Ilieva P., Kilzer A., Weidner E. Measurement of solubility, viscosity, density and interfacial tension of the systems tristearin and CO₂ and rapeseed oil and CO₂. *Journal of Supercritical Fluids*. 2016, V. 117, pp. 40–49.

References

1. Vidya P., Mohd M., Vishal L., Samreen F. Supercritical Fluid Extraction: Applications to Biological System. Research. *Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2015, V. 6, no. 4, pp. 371–378.
2. Casas L., Mantell C., Rodriguez M., Torres A., Macias F.A. Supercritical fluid extraction of bioactive compounds from sunflower leaves with carbon dioxide and water on a pilot plant scale. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2008, V. 45, pp. 37–42.
3. Cocero M.J., J. Garcia J. Mathematical model of supercritical extraction applied to oil seed extraction by CO₂ and saturated alcohol. *Journal of Supercritical Fluids*. 2001, no. 20, pp. 245–255.
4. Fiori L. Supercritical extraction of sunflower seed oil: Experimental data and model validation. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2009, V. 50, pp. 218–224.
5. King J.W., List G.R. *Supercritical Fluid Technology in Oil and Lipid Chemistry*. AOCS Press J.W., Illinois, 1996, p. 34.
6. Kiriamiti H.K., Rascol E., Marty A., Condoret J.S. Extraction rate of oil from high oleic sunflower seeds with supercritical carbon dioxide. *Chem. Eng. Process*. 2002, V. 41, pp. 711–718.
7. Rodrigues A.R., Paiva A., Marco Gomes da Silva, Simões P., Barreiros S. Continuous enzymatic production of biodiesel from virgin and waste sunflower oil in supercritical carbon dioxide. *Journal of Supercritical Fluids*. 2001, V. 20, pp. 245–255.
8. Dadashev M.N., Kobelev K.B., Chursina O.A., Vinokurov V.A., Filenko D.G. Study of the process of supercritical extraction of aromatic substances from renewable plant materials. *Storage and Processing of Farm Products*. 2014, no. 1, pp. 29–32.
9. Bakhvalov N.S., Panasenko G.P. *Averaging of processes in batch media: mathematical problems in the mechanics of composite materials*. Moscow, Nauka Publ., 1984, 352 p. (In Russian).
10. Starkov A.S., Starkov I.A. Application of the generalized matrix averaging method to calculate the effective properties of thin films of multiferroics. *Journal of Experimental Theoretical Physics*. 2014, V. 146, no. 5, pp. 980–989 (In Russian).
11. Grunberg L., Nissan A. H. Mixture law for viscosity. *Nature*. 1949. V. 164, no. 4175, P. 799.
12. Irving G.B. *Viscosity of binary liquid mixtures: the effictiveness of mixture equations*; NEL report №631; National Engineering Laboratory: East Kilbride, Glasgow, Scotland, 1977.

13. Landau L.D., Lifshits E.M. *Theoretical physics*. 10 V. Hydrodynamics. V. 6. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 736 p. (In Russian).
14. Vinogradov G.V., Malkin A.Ya. *Rheology of polymers*. Moscow, Chemistry Publ., 1977. 440 p. (In Russian).
15. Orr F.M., Taber J.J. Use of carbon dioxide in enhanced oil recovery. *Science*. 1984, V. 224, no. 4649, pp. 563–569.
16. Melnik G.E., Volkov S.M., Fedorov A.V. Supercritical carbon dioxide: possibilities of application in the production of vegetable oil. *Processes and Food Production Equipment*. 2016, no. 1, pp. 3–14 (In Russian).
17. Melnik G.E., Volkov S.M. Application of supercritical carbon dioxide extraction technology for the extraction of sunflower oil. *Bulletin of the All-Russian Research Institute of Fats*. 2016, no. 1–2, pp. 40–45 (In Russian).
18. Kaplun A.B., Meshalkin A.B. A single equation for calculating the viscosity coefficient of carbon dioxide. *Herald of Kazan Technological University*. 2014, V. 17, no. 21, pp. 108–113 (In Russian).
19. Kozlov A.D., Mamonov Yu.V. et al. Carbon dioxide. The coefficients of dynamic viscosity and thermal conductivity at temperatures of 220 ... 1000 K and pressures from the corresponding discharged gas to 100 MPa. *Standard Reference Tables GSSSD 110-87*. Moscow, Standards Publ., 1988, 17 p. (In Russian).
20. Gabitov R.R., Nakipov R.R., Shamsetdinov F.N., Usmanov R.A., Khfirullin I.Kh., Zaripov Z.I. The portable properties of vegetable oils. *Herald of Kazan Technological University*. 2012, V. 15, no. 21, pp. 25–27 (In Russian).
21. Maksimuk Yu.V., Antonova Z.A., Fesko V.V., Kursevich V.N. Viscosity and calorific value of diesel biofuel. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2009, no. 5, pp. 27–30 (In Russian).
22. Meretukov Z.A., Koshevoi E.P., Kosachev V.S. Density and viscosity of carbon dioxide solutions in vegetable oils during the pressing of oilseeds. *New Technologies*. 2011, no. 4, pp. 62–65 (In Russian).
23. Ilieva P., Kilzer A., Weidner E. Measurement of solubility, viscosity, density and interfacial tension of the systems tristearin and CO₂ and rapeseed oil and CO₂. *Journal of Supercritical Fluids*. 2016, V. 117, pp. 40–49.

Статья поступила в редакцию 05.11.2019