



УДК 665. 1/3

ДИССИПАТИВНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОВЯЗКИХ СРЕД

В.Б. Тишин^a, А.В. Федоров^{a,b}, А.Г. Новоселов^a, А.А. Федоров^a, Э.Р. Мамедов^a^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация^b ВНИИЖиров, Санкт-Петербург, 191119, Российская ФедерацияАдрес для переписки: afedorov@corp.ifmo.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 18.07.18, принята к печати 26.12.18

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-95-101

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Тишин В.Б., Федоров А.В., Новоселов А.Г., Федоров А.А., Мамедов Э.Р. Диссипативный метод исследования реологических свойств высоковязких сред // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 95–101. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-95-101

Аннотация

Исследование реологических свойств высоковязких сред представляет и практический, и научный интерес, поскольку их необходимо учитывать при расчете энергетических затрат на производство, оборудования, а также при изучении структуры сред и законов течения. Как правило, исследования реологических свойств высоковязких сред, проявляющих неньютоновские свойства, проводятся на ротационных или капиллярных вискозиметрах. Однако использовать полученные таким образом данные в технических расчетах оборудования довольно сложно. Причина кроется в различии гидродинамических условий, от которых зависит вязкость неньютоновских жидкостей. Предложен метод исследования реологических свойств высоковязких жидкостей, основанный на превращении механической энергии сил трения при перемешивании в тепловую. Обоснована необходимость использования предлагаемого метода в реологических исследованиях высоковязких сред. Представлено теоретическое объяснение физической сути метода, выполнен вывод уравнения для расчета вязкости. Проведена экспериментальная проверка предложенного метода на примере определения вязкости водного раствора глицерина 95 %-ной концентрации, полученные данные сопоставлены с известными результатами из литературы. Расхождение опытных и расчетных значений критерия мощности составило не более 14 %.

Ключевые слова

диссипативный метод, реологические исследования, энергия, вязкость, перемешивание, скорость сдвига

DISSIPATIVE METHOD OF RESEARCH OF HIGH-VISCOSITY MEDIA RHEOLOGICAL PROPERTIES

V.B. Tishin^a, A.V. Fedorov^{a,b}, A.G. Novoselov^a, A.A. Fedorov^a, E.R. Mamedov^a^aITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation^bAll-Russian Research Institute of Fats, Saint Petersburg, 191119, Russian FederationCorresponding author: afedorov@corp.ifmo.ru

Article info

Received 18.07.18, accepted 26.12.18

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-95-101

Article in Russian

For citation: Tishin V.B., Fedorov A.V., Novoselov A.G., Fedorov A.A., Mamedov E.R. Dissipative method of research of high-viscosity media rheological properties. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 95–101 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-95-101

Abstract

The rheological properties research of highly viscous fluid is attractive from both practical and scientific points of view. The research is necessary in the calculation of energy cost of production, equipment, and in the research of their structure of media and flow rules. In general, the rheological properties research of highly viscous fluids, which demonstrate non-Newtonian fluid properties, are carried out on the rotation and capillary viscometers. However, it is rather difficult to use the data obtained in this way in the technical calculations of the equipment. The reason is the difference in hydrodynamic conditions on which the viscosity of non-Newtonian fluids depends. A method for studying the rheological properties of highly viscous fluid is considered based on the conversion of friction mechanical energy to the heat energy during agitation. The necessity of using the proposed method in rheological studies of highly viscous media has been substantiated. Theoretical explanation of the physical essence of the method is presented and the equation for viscosity calculation is

derived. An experimental verification of the suggested method was carried out using the example of determining the viscosity of glycerin aqueous solution at 95 % concentration; the obtained data are compared with known results from the literature. The discrepancy between the experimental and calculated values of the power criterion was no more than 14 %.

Keywords

dissipative method, rheogoniometry, energy, viscosity, mixing, sliding velocity

Введение

Исследование реологических свойств высоковязких сред, таких как растворы и расплавы полимеров, краски, пищевые продукты (кремы, кисломолочные изделия, фарши) и т.п., представляет и практический, и научный интерес, поскольку их необходимо учитывать при расчете энергетических затрат на производство, оборудования, а также при изучении структуры сред и законов течения [1–4].

Как правило, исследования реологических свойств высоковязких сред, проявляющих неньютоновские свойства, проводятся на ротационных или капиллярных вискозиметрах [1, 4, 5]. Учеными разработана деталь ротационного вискозиметра, позволяющая определять вязкость жидкостей малых объемов. Значения вязкости, полученные при апробации детали (глицерин объемом 0,1–0,3 мл) аналогичны заявленным [6].

Однако использовать полученные таким образом данные в технических расчетах оборудования довольно сложно, а для определения затрат энергии на перемешивание в аппаратах с мешалками – невозможно. Проблема состоит в различии гидродинамических условий, в которых происходит движение среды и от которых зависит вязкость неньютоновских жидкостей. Измерение вязкости в ротационных и капиллярных приборах возможно при условии чистого сдвига в зазоре между ротором и статором или в капилляре, соблюсти которое в реальных аппаратах невозможно. Помимо того, для определения эффективной вязкости по имеющимся кривым течения продукта необходимо знать значения градиентов скоростей или касательных напряжений в конкретном аппарате – в большинстве случаев в литературе эта информация отсутствуют.

В работе [7] предложено теоретическое обоснование метода измерения вязкости сложной реологической среды, сочетающего преимущества ротационных и капиллярных методов. Исследуемая среда движется в торообразном канале под действием сил инерции. Во время движения измеряется момент трения и производится расчет вязкости. Для расчета вязкости используется уравнение движения вдоль одной из осей в тороидальных координатах. Также в [7] представлены прототип испытательной установки и система сбора и измерения данных, позволяющая автоматизировать исследование.

Авторами [8] в динамическом режиме проведены реологические измерения фракций апельсинового сока с различной концентрацией взвешенных твердых частиц разного размера. В результате установлено, что с увеличением содержания взвешенных частиц удельная энергия сцепления возрастает независимо от их размера.

На реологические характеристики продуктов существенно влияют концентрация сухих веществ и температура. В работе [9] проанализированы реологические свойства виноградного сока. Исследования проводились с использованием реометра в широком диапазоне температур (1–66 °С) и концентрации при скорости сдвига 0,84–212,1 с⁻¹. Концентраты сока характеризовались неньютоновским псевдопластическим поведением. Энергия активации потока колебалась от 2887 до 3805 кДж/моль. Таким образом, установлено, что плотность и удельная теплоемкость зависят как от температуры, так и от концентрации сухих веществ, однако теплопроводность зависит только от последнего параметра.

Группой ученых [10] исследованы реологические свойства концентрированного мандаринового сока при низких температурах (от –12 до +6 °С). В исследуемом интервале температур проявляются вязкоупругие свойства, при повышении температуры возрастают значения упругости и снижается вязкость.

Определять вязкость продуктов возможно также с помощью теоретических моделей, позволяющих определить объемную долю, фрактальную размерность частиц, а также силы межмолекулярного взаимодействия [11].

В частной беседе с одним из авторов данной статьи (В.Б. Тишиным) В.В. Консетов, исследователь в области реологии и тепломассообмена в полимеризационных процессах [3], предложил использовать диссипативный метод, основанный на изучении кинетики разогрева жидкости, вызванного силами трения. В известной литературе имеются лишь сведения о влиянии диссипативного нагрева на точность измерения вязкости в ротационном вискозиметре и возможности исключения этого влияния [4]. Исследования с использованием диссипативного метода можно проводить в аппаратах в производственных условиях и на реальных средах.

Возможно использовать метод мезоскопического моделирования – диссипативной динамики частиц, широко используемый для описания реологии коллоидных суспензий [12–14]. Такой метод позволяет осуществлять моделирование в большем масштабе длины и времени. Результаты исследования показывают, что коэффициент диффузии дисперсии уменьшается, а вязкость увеличивается с заданной скоростью при увеличении объемных долей частиц среды. Уменьшение вязкости характеризуется увеличением скорости сдвига при тех же объемных долях суспензии.

Целью настоящей статьи являются разработка теоретических основ диссипативного исследования реологических свойств жидких сред в аппаратах с перемешивающими устройствами и создание методики проведения экспериментальных исследований. Для достижения поставленной цели необходимо:

- проанализировать возможность определения вязкости перемешиваемой среды из совместного решения уравнений баланса тепловой и механической энергии и затрат энергии на перемешивание;
- разработать методику проведения экспериментов с учетом аппаратуры, на которой они будут проводиться;
- сопоставить теоретические и экспериментальные результаты и дать рекомендации по использованию предлагаемого метода в реологических исследованиях высоковязких жидкостей.

Теоретический анализ

Хорошо известно, что при движении жидкости превращение механической энергии вязкого трения в тепловую математически описывается уравнением [15], которое для одномерного течения приводится к виду:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \mu(T) \gamma^2, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости; c_p – теплоемкость; T – температура; t – время, с; μ – коэффициент динамической вязкости; γ – скорость сдвига. Из уравнения (1), зная значение левой части равенства и скорость сдвига – в правой, можно вычислить величину коэффициента динамической вязкости.

Размерность левой и правой части равенства (1) – Вт/м³, т.е. это есть мощность диссипативного источника энергии E , отнесенная к единице объема. Ее еще называют удельной мощностью или скоростью диссипации энергии. С учетом последнего замечания уравнение (1) запишем в следующем виде:

$$E = \frac{N}{V} = k \rho c_p T'(t) = k \mu(T) \gamma^2, \quad (2)$$

В уравнении (2) коэффициент k используется для описания связи осредненных значений удельной мощности с локальными. Как показали расчеты по диссипативному нагреву молока, при гомогенизации коэффициент k близок к единице [16].

Из уравнения (2) следует, что мощность диссипативного источника энергии:

$$N = M c_p T'(t), \quad (3)$$

где M – масса жидкости.

С другой стороны, известно, что мощность перемешивающего устройства определяется уравнением [17, 18]:

$$N = K_N \rho n^3 d^5, \quad (4)$$

где n – частота вращения мешалки; d – диаметр мешалки; K_N – критерий мощности, зависящий от критерия Рейнольдса:

$$K_N = A / \text{Re}_c^m. \quad (5)$$

Показатель степени m в уравнении (5) меняется от нуля при турбулентном режиме перемешивания и до единицы – при ламинарном. Проводить исследования следует при ламинарном режиме перемешивания, поскольку при турбулентном режиме влияние вязкости снижается ($K_N = \text{const}$). Значения коэффициентов A для некоторых типов перемешивающих устройств даются в справочной литературе [17]. Центробежный критерий Рейнольдса рассчитывается по известной формуле:

$$\text{Re}_c = \frac{\rho n d^2}{\mu}. \quad (6)$$

В уравнении (5) коэффициент A зависит только от типа мешалки и не зависит от физических свойств перемешиваемой среды. Поэтому при известных значениях A из уравнений (2)–(6):

$$\gamma = \left(\frac{A \rho n^2 d^3}{M} \right)^{0.5}, \quad (7)$$

а производная в уравнениях (1)–(3)

$$T'(t) = b = \frac{A \mu n^2 d^3}{c_p M}. \quad (8)$$

С учетом (7) и (8) из уравнения (2) следует:

$$\mu = \frac{Mc_p b}{An^2 d^3}. \quad (9)$$

Чтобы найти величину вязкости по уравнению (9), необходимо знать значения коэффициентов A и b . Коэффициент b находится по изменению температуры жидкости во времени при перемешивании. Исследования проведем при следующих условиях:

- 1) температура жидкости, вследствие диссипативного нагрева за время Δt , повышается незначительно, что позволяет считать ее физические свойства постоянными;
 - 2) потерями теплоты в окружающую среду можно пренебречь вследствие теплоизоляции прибора.
- В таком случае вместо $\mu(T)$ (см. (1) и (2)) будем использовать $\mu = \text{const}$.

Исходя из этих условий при $\gamma = \text{const}$ в уравнении (8) примем $T'(t) = b = \text{const}$. Интегрирование равенства (2) в пределах от T_n до T и от $t_n = 0$ до t дает линейную зависимость температуры во времени

$$T(t) = T_n + bt, \quad (10)$$

где T_n – начальная температура. Коэффициент b характеризует скорость повышения температуры перемешиваемой среды в процессе диссипативного нагрева.

Методика проведения эксперимента

Если известно значение коэффициента A , суть реологических исследований будет сводиться к следующему. В аппарате с механической мешалкой в течение заданного времени перемешивается определенное количество исследуемой жидкости, и через некоторые промежутки времени измеряется ее температура. Получив кинетику изменения температуры во времени и определив в явном виде функциональную зависимость $T=f(t)$, из уравнения (10) находим коэффициент b . Подставив полученное значение коэффициента b в уравнение (9), получим значение вязкости исследуемой жидкости μ .

Так как в опытах измеряются средние значения температуры по объему аппарата, то и определяться будут осредненные значения диссипации энергии, градиентов скорости и коэффициентов динамической вязкости. С целью снижения влияния температуры на величину вязкости исследуемой жидкости нагрев не должен превышать $1-2^\circ$ (это можно достичь, повысив точность измерения температуры).

Если исследования проводятся в аппарате, для которого значение A не найдено, необходимо провести предварительные опыты с жидкостью, реологические свойства которой известны.

Рассмотрим для примера аппарат с двумя Z-образными мешалками, вращающимися с частотами n_1 и n_2 (рис. 1).

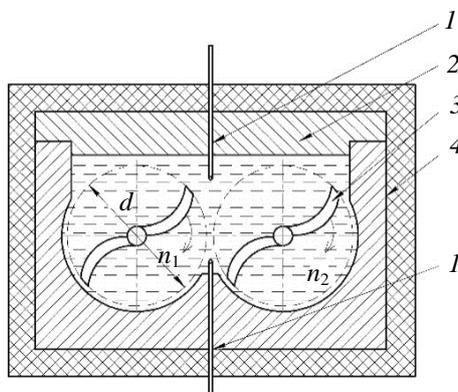


Рис. 1. Экспериментальная установка, реализующая диссипативный метод определения вязкости жидкости:
1 – термометры, 2 – крышка камеры, 3 – Z-образные мешалки, 4 – теплоизолированный корпус

Были проведены опыты по перемешиванию водного раствора 95 %-ного глицерина при $T=20^\circ\text{C}$, $\rho=1250 \text{ кг/м}^3$, $C_p=2500 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$, $\mu=0,523 \text{ Па}\cdot\text{с}$ [17, 18].

Мешалки диаметром $d=0,068 \text{ м}$ вращаются в противоположных направлениях (рис. 1), $n_1/n_2=1,5$ (эксперименты проводились при $n_2=0,4; 0,6; 0,8; 1 \text{ об/с}$). Масса загружаемой в смеситель жидкости была постоянной и $M=\rho V=0,78 \text{ кг}$, где V – объем жидкости, м^3 . Начальная температура колебалась от $+19$ до $+24^\circ\text{C}$ и измерялась хромель-копелевой термопарой с точностью до $0,05^\circ$.

Результаты экспериментальных исследований по кинетике разогрева глицерина при $n_2 = 0,5$ (1) и $0,75 \text{ об/с}$ (2) представлены на рис. 2.

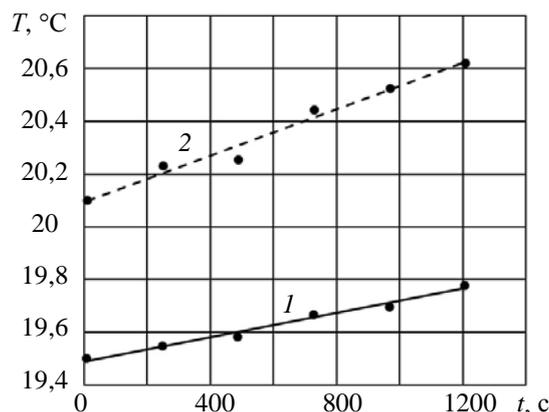


Рис. 2. Изменение температуры глицерина в процессе перемешивания. Точки соответствуют опытным данным, кривые получены по уравнению (10)

Представленные на рис. 2 результаты измерений подтверждают линейную зависимость изменения температуры во времени, что возможно, согласно уравнению (1), только при $\mu = \text{const}$. Таким образом, можно признать принятую методику проведения экспериментов верной.

В эксперименте две мешалки вращаются с различными частотами, а по кинетике разогрева жидкости измеряется осредненная величина выделившейся тепловой энергии. Значения полученного по различным методикам коэффициента A (см. (5)) могут различаться. Нами был выбран наиболее простой вариант: критерий Рейнольдса рассчитывался по среднеарифметическому значению числа оборотов $n_c = 1,25n_2$.

При известном b из уравнения (9) найден коэффициент $A = 9300$. Таким образом, для данного смесителя:

$$K_N = \frac{9300}{\text{Re}}. \quad (11)$$

Критерий Рейнольдса в опытах изменялся от 5 до 14, а скорость сдвига γ – от 34 до 86 с^{-1} .

На рис. 3 сопоставлены рассчитанные по уравнениям (9) и (11) значения K_N при вязкости глицерина $\mu = 0,523 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $m = 1$ (точки и кривая соответственно). Максимальное расхождение между ними не превышает 14 %.

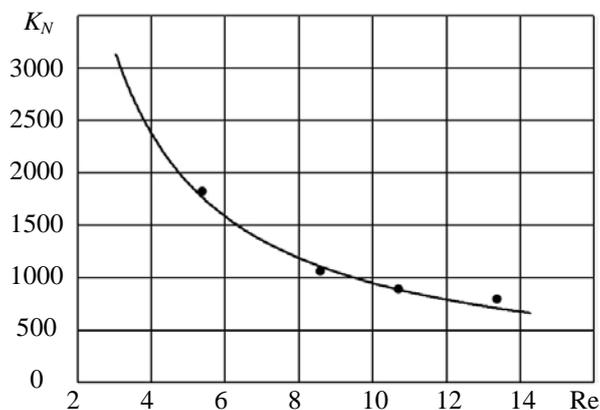


Рис. 3. Зависимость критерия мощности K_N от числа Рейнольдса

Заключение

Экспериментально доказана возможность применения диссипативного метода для исследования реологических свойств высоковязких жидкостей в аппаратах с перемешивающими устройствами.

В литературе перемешивающие устройства со значением $A = 9300$ авторы не нашли. Возможно, при ламинарном режиме перемешивания (в работе [16] течение жидкости было турбулентным) значение k в уравнении (2) отличается от единицы.

При проведении экспериментов в измерительных ячейках, конструктивно отличающихся от использованной авторами данной работы, необходимо предварительно найти значение коэффициента A .

Несмотря на то что предлагаемый метод требует дальнейшего совершенствования, его экспериментальная проверка на примере разогрева 95 %-ного глицерина показала перспективность в проведении исследований реологических свойств высоковязких жидкостей.

Литература

1. Маслов А.М. Аппараты для термообработки высоковязких жидкостей. Л.: Машиностроение, 1980. 208 с.
2. Арет В.А., Николаев Б.Л., Забровский Г.П., Николаев Л.К. Реологические расчеты оборудования производства жиродержащих пищевых продуктов. СПб: СПбГУНИИПТ, 2004. 342 с.
3. Будтов В.П., Консетов В.В. Тепломассоперенос в полимеризационных процессах. Л.: Химия, 1983. 256 с.
4. Столин А.М., Мержанов А.Г., Плотникова Н.В., Шаталов Б.Н. Способ определения вязкости жидкостей. Авторское свидетельство 2476841/18. Бюл. 1979. № 12.
5. Aniket A., Kumari P., Kumari S., Saurabh L., Khurana K., Rathore S. Formulation and evaluation of topical soy-phytosome cream // *Indian Journal of Pharmacy and Pharmacology*. 2015. V. 2. N 2. P. 105–112.
6. Шахматов К.С., Дonya Д.В., Басова Г.Г. Способ определения вязкости жидкостей малых объемов // *Вестник КузГТУ*. 2017. № 4 (122). С. 126–130.
7. Kornaeva E., Kornaev A., Savin L. Inertial method of viscosity measurement of the complex rheology medium // *Procedia Engineering*. 2016. V. 150. P. 626–634. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.056
8. Dahdouh L., Wisniewski C., Ricci J., Vachoud L., Dornier M., Delalonde M. Rheological study of orange juices for a better knowledge of their suspended solids interactions at low and high concentration // *Journal of Food Engineering*. 2016. V. 174. P. 15–20. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.11.008
9. de Castilhos M.B.M., Betioli L.F.L., de Carvalho G.R., Telis-Romero J. Experimental study of physical and rheological properties of grape juice using different temperatures and concentrations. Part I: Cabernet Sauvignon // *Food Research International*. 2017. V. 100. P. 724–730. doi: 10.1016/j.foodres.2017.07.075
10. Falguera V., Velez Ruiz J.F., Alins V., Ibarz A. Rheological behaviour of concentrated mandarin juice at low temperatures // *International Journal of Food Science and Technology*. 2010. V. 45. N 10. P. 2194–2200. doi: 10.1111/j.1365-2621.2010.02392.x
11. Genovese D.B., Lozano J.E., Rao M.A. The rheology of colloidal and noncolloidal food dispersions // *Journal of Food Science*. 2007. V. 72. N 2. P. R11–R20. doi: 10.1111/j.1750-3841.2006.00253.x
12. Tu J., Wen L., Wang L., Zhang S., Bai C., Zou C. Simulating the rheology of suspensions using dissipative particle dynamics // *Procedia Engineering*. 2015. V. 102. P. 1593–1598. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.295
13. Boek E.S., Coveney P.V., Lekkerkerker H.N.W., Van der Schoot P. Simulating the rheology of dense colloidal suspensions using dissipative particle dynamics // *Physical Review E*. 1997. V. 55. N 3. P. 3124–3133. doi: 10.1103/physreve.55.3124
14. Boromand A., Jamali S., Joao M.M. Viscosity measurement techniques in dissipative particle dynamics // *Computer Physics Communications*. 2015. V. 196. P. 149–160. doi: 10.1016/j.cpc.2015.05.027
15. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 744 с.
16. Тишин В.Б. Диссипативный нагрев жидкостей в процессе их гомогенизации // *Индустрия напитков*. 2010. № 6. С. 52.
17. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М., Курочкина М.И. Примеры и задачи по курсу процессы и аппараты химической технологии. СПб: Химия, 1993. 495 с.
18. Фролов В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». СПб: Химиздат, 2003. 607 с.

Авторы

Тишин Вячеслав Борисович – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 66033988463, ORCID ID: 0000-0003-3995-2589, tishinbv@mail.ru

References

1. Maslov A.M. *Apparatus for Heat Treatment of Highly Viscous Liquids*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980, 208 p. (in Russian)
2. Aret V.A., Nikolaev B.L., Zabrovskii G.P., Nikolaev L.K. *Rheological Calculations of Equipment for Fat-Containing Food Products Manufacturing*. St. Petersburg, SPbSULFT Publ., 2004, 342 p. (in Russian)
3. Budtov V.P., Konsetov V.V. *Heat and Mass Transfer in Polymerization Processes*. Leningrad, Khimiya Publ., 1983, 256 p. (in Russian)
4. Stolin A.M., Merzhanov A.G., Plotnikova N.V., Shatalov B.N. Method for Determining the Viscosity of Liquids. *Certificate 2476841/18*. 1979. (in Russian)
5. Aniket A., Kumari P., Kumari S., Saurabh L., Khurana K., Rathore S. Formulation and evaluation of topical soy-phytosome cream. *Indian Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 105–112.
6. Shakhmatov K.S., Donya D.V., Basova G.G. Method for determining the viscosity of small volume fluids. *Vestnik of Kuzbass State Technical University*, 2017, no. 4, pp. 126–130. (in Russian)
7. Kornaeva E., Kornaev A., Savin L. Inertial method of viscosity measurement of the complex rheology medium. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 626–634. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.056
8. Dahdouh L., Wisniewski C., Ricci J., Vachoud L., Dornier M., Delalonde M. Rheological study of orange juices for a better knowledge of their suspended solids interactions at low and high concentration. *Journal of Food Engineering*, 2016, vol. 174, pp. 15–20. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.11.008
9. de Castilhos M.B.M., Betioli L.F.L., de Carvalho G.R., Telis-Romero J. Experimental study of physical and rheological properties of grape juice using different temperatures and concentrations. Part I: Cabernet Sauvignon. *Food Research International*, 2017, vol. 100, pp. 724–730. doi: 10.1016/j.foodres.2017.07.075
10. Falguera V., Velez Ruiz J.F., Alins V., Ibarz A. Rheological behaviour of concentrated mandarin juice at low temperatures. *International Journal of Food Science and Technology*, 2010, vol. 45, no. 10, pp. 2194–2200. doi: 10.1111/j.1365-2621.2010.02392.x
11. Genovese D.B., Lozano J.E., Rao M.A. The rheology of colloidal and noncolloidal food dispersions. *Journal of Food Science*, 2007, vol. 72, no. 2, pp. R11–R20. doi: 10.1111/j.1750-3841.2006.00253.x
12. Tu J., Wen L., Wang L., Zhang S., Bai C., Zou C. Simulating the rheology of suspensions using dissipative particle dynamics. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 102, pp. 1593–1598. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.295
13. Boek E.S., Coveney P.V., Lekkerkerker H.N.W., Van der Schoot P. Simulating the rheology of dense colloidal suspensions using dissipative particle dynamics. *Physical Review E*, 1997, vol. 55, no. 3, pp. 3124–3133. doi: 10.1103/physreve.55.3124
14. Boromand A., Jamali S., Joao M.M. Viscosity measurement techniques in dissipative particle dynamics. *Computer Physics Communications*, 2015, vol. 196, pp. 149–160. doi: 10.1016/j.cpc.2015.05.027
15. Schlichting H. *Boundary-Layer Theory*. McGraw Hill, 1968.
16. Tishin V.B. Dissipative heating of liquids in the process of their homogenization. *Industriya Napitkov*, 2010, no. 6, p. 52. (in Russian)
17. Romankov P.G., Frolov V.F., Flisyuk O.M., Kurochkina M.I. *Examples and Tasks for the Course of Chemical Technology Processes and Apparatus*. St. Petersburg, Chemistry Publ., 1993, 495 p. (in Russian)
18. Frolov V.F. *Lectures on Course Processes and Apparatuses of Chemical Technology*. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2003, 607 p. (in Russian)

Authors

Vyacheslav B. Tishin – D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 66033988463, ORCID ID: 0000-0003-3995-2589, tishinbv@mail.ru

Федоров Александр Валентинович – доктор технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; главный научный сотрудник, ВНИИЖиров, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация, Scopus ID: 56803201500, ORCID ID: 0000-0003-3847-6269, afedorov@corp.ifmo.ru

Новоселов Александр Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 7004454458, ORCID ID: 0000-0002-9432-7447, dekrash@mail.ru

Федоров Алексей Александрович – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-3860-7708, alex2829735@yandex.ru

Мамедов Эдгар Рамазан оглы – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-2266-4564, mamedovs1612@gmail.com

Alexander V. Fedorov – D.Sc., Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Chief Researcher, All-Russian Research Institute of Fats, Saint Petersburg, 191119, Russian Federation Scopus ID: 56803201500, ORCID ID: 0000-0003-3847-6269, afedorov@corp.ifmo.ru

Alexander G. Novoselov – D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 7004454458, ORCID ID: 0000-0002-9432-7447, dekrash@mail.ru

Alexey A. Fedorov – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-3860-7708, alex2829735@yandex.ru

Edgar Ramazan ogly Mamedov – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-2266-4564, mamedovs1612@gmail.com