

Научная статья

УДК 665.35:32.13

DOI: 10.17586/2310-1164-2021-14-4-3-11

Вязкость нерафинированных подсолнечных масел при направленном механическом воздействии

С.М. Волков¹, А.В. Федоров^{1,2*}, А.Г. Новоселов², А.А. Федоров², И.А. Фридман^{1,3}, Н.Н. Романов⁴¹Всероссийский научно-исследовательский институт жиров²Университет ИТМО³Санкт-Петербургский химико-фармацевтический университет⁴Санкт-Петербургский государственный университет ГПС МЧС России
Россия, Санкт-Петербург, *afedorov@ifmo.ru

Аннотация. Устанавливали закономерности изменения вязкости подсолнечного масла от параметров внешнего направленного механического воздействия. Объектом исследования выбраны нерафинированные подсолнечные масла высокоолеинового и линолевого типа, которые отличаются широким спектром концентрации содержащихся в них компонентов. Состав масел определялся с помощью газожидкостной хроматографии, а эксперименты по исследованию вязкости проводились на ротационном вискозиметре. Разработаны методики подготовки образцов, условий проведения экспериментальных исследований и хранения. Получены новые данные по вязкости при возрастающем и убывающем ротационном усилии. Установлены диапазоны градиентов скоростей сдвига, при которых наблюдается эффект «гистерезиса» изменения вязкости нерафинированных подсолнечных масел в зависимости от увеличения или уменьшения ротационного усилия. Получены временные характеристики устойчивого сохранения его структурных изменений в стационарном состоянии.

Ключевые слова: растительные жиры; нерафинированное подсолнечное масло; эффективная вязкость; коэффициент динамической вязкости; градиент скорости сдвига; микрокомпоненты; макрокомпоненты; жирнокислотный состав

Original article

Viscosity of unrefined sunflower oils under directed mechanical action

Sergey M. Volkov¹, Alexander V. Fedorov^{*1,2}, Alexander G. Novoselov², Alexey A. Fedorov²,
Ilya A. Fridman^{1,3}, Nikolai N. Romanov⁴¹All-Russian research Institute of fats²ITMO University³St. Petersburg Chemical and Pharmaceutical University⁴Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia
St. Petersburg, Russia, *afedorov@ifmo.ru

Abstract. The purpose of the research was to establish patterns of changes in the viscosity of sunflower oil from the parameters of external directional mechanical action. The object of the study was unrefined sunflower oils of high oleic and linoleic type, which differ in a wide range of concentrations of their components. The composition of the oils has been determined using gas-liquid chromatography, and viscosity experiments were carried out on a rotary viscometer. Methods of sample preparation, experimental research conditions, and storage have been developed. New data on viscosity with increasing and decreasing rotational force have been obtained. Ranges of gradients of shear rates have been established, at which the effect of "hysteresis" of changes in the viscosity of unrefined sunflower oils is observed, depending on the increase or decrease in rotational force. The time characteristics of the stable preservation of its structural changes in a stationary state have been obtained.

Keywords: vegetable fats; unrefined sunflower oil; effective viscosity; dynamic viscosity coefficient; shear rate; micro-components; macro-components; fatty acid composition

Введение

Производимые в Российской Федерации растительные масла используются в основном для пищевых целей, а примерно десятая часть – непищевых. Они применяются в парфюмерно-косметической, фармацевтической, топливно-энергетической, обрабатывающей промышленности. Растительные масла доступны, поддаются биологическому разложению и сокращают вредные

выбросы [1]. Самое важное — это возобновляемый ресурс. Подсолнечное масло устойчиво занимает первое место в общем объеме производства. Отмечается заметный рост исследований физико-химических свойств растительных масел. Это позволяет фиксировать возможные изменения фазового состояния и структуры технологических потоков. Полученные при этом закономерности изменений, особенно таких информативных параметров, как вязкость, повышают адекватность физических и математических моделей.

В работах [2] и [3] авторами реализован системный комплексный подход к разработке методов использования растительных масел в производстве мыла на основе глубокого изучения физико-химических свойств и гидродинамики многофазных жидких смесей. В рамках этих исследований получены многочисленные экспериментальные данные о реологических свойствах растительных масел, имеющих разнообразный жирнокислотный состав. Теоретические аспекты применения растительных масел, в том числе подсолнечного масла, в косметических эмульсиях представлены в [4]. Авторы отмечают, что усиление полезных свойств мыла, кремов, увлажняющих и очищающих средств для кожи при введении в их состав растительных масел достигается благодаря присутствию в них полифенолов, а также высокому содержанию витаминов. В работе [5] приведены исследования влияния подсолнечного масла на качественные характеристики косметических композиций: его включение уменьшало энергию сдвига составов, улучшало их текстуру.

Отдельная перспективная область — применение растительных масел в энергетических установках и агрегатах. Характер изменения вязкости растительных масел в экстремальных условиях повышенных температур и давлений при работе двигателя внутреннего сгорания, работающего на биотопливе, изучали в работе [6]. Использование растительных масел в обрабатывающей промышленности для термической обработки металлов ретроспективно рассмотрено в [7]. Авторами отмечено, что включение растительных масел в процесс закалки металлов позволяет достичь более равномерного охлаждения за счет ряда особенностей их физико-химических свойств.

Макрокомпонентную основу растительных масел составляют сложные эфиры жирных кислот с глицерином, выделяющимся при их гидролизе. В связи с этим, в работах [8] и [9] изучались зависимости вязкости глицерина от температуры, давления и плотности с использованием теории свободного объема и термодинамического масштабирования. Изменения вязкости и поверхностного натяжения бинарных смесей глицерина исследовались в диапазоне температур от 293 до 323 К и при атмосферном давлении. Приведены также данные о численных значениях вязкости глицерина при давлениях выше атмосферного. Зависимость динамической вязкости пищевого рафинированного подсолнечного масла от температуры изучена в работах [10] и [11]. При этом определены эмпирические модели, которые показывают, что динамическая вязкость подсолнечного масла уменьшается экспоненциально с увеличением температуры в диапазоне от 313 до 373 К и градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от 3,3 до 120 с⁻¹. Результаты исследований, представленные в [12], также подтверждают, что температура сильно влияет на вязкость и удельную теплоемкость растительных масел. Так вязкость уменьшается экспоненциально, а удельная теплоемкость линейно возрастает с повышением температуры. Вязкость при 35°C была примерно в 10–15 раз выше вязкости при 180°C, в то время как процентное увеличение удельной теплоемкости от 35 до 180°C составляло около 17%.

Анализ научных работ в рассматриваемой области знаний показывает, что их целью является изучение закономерностей изменений реологических характеристик растительных масел в зависимости от их состава. Так в публикациях [13] и [14] представлены результаты влияния жирнокислотного состава растительных масел на статические и динамические реологические свойства. Устойчивые реологические свойства образцов масла были измерены в диапазоне скоростей сдвига от 0,1 до 100 с⁻¹. В результате установлено, что вязкость растительных масел возрастает с ростом мононенасыщенных (МНЖК) и полиненасыщенных (ПНЖК) жирных кислот. Такой динамический механический параметр, как касательное напряжение также может рассчитываться с использованием состава масел, а именно МНЖК и ПНЖК.

В общественном питании и при приготовлении пищи растительное масло, как известно, применяется с незапамятных времен. Однако в настоящее время технологические процессы здесь интенсифицируются и максимально автоматизируются, поэтому заметно углубление научных

исследований в этой области. В работе [15] представлены данные измерений плотности, теплопроводности, теплоемкости и вязкости масел, используемых для фритюра и для жарки пищи. При этом отмечено изменение вязкости масел по мере роста времени его использования, связанное с ростом содержания продуктов окисления. Авторы вообще предлагают оценивать качество используемого масла по его вязкости. Зависимость некоторых критериев качества пищевых растительных масел от их состава изучено в исследовании [16] на примере образцов масла, полученного из семи различных гибридов подсолнечника, произрастающего в местных экологических условиях в течение одного сезона. Комплексный подход к изучению реологических и теплофизических свойств растительных масел использован авторами [17], которые представили экспериментальные данные, охватывающие большой практический диапазон режимных параметров. Возможность использования реологических свойств эмульсий на основе растительных масел для оценки структурного состояния многофазных жидкостей исследована в работах [18] и [19], где исследовался характер изменений эффективной вязкости эмульсий на основе растительных масел в процессе гидродинамического воздействия. Экспериментальные данные показали, что в процессе механического воздействия на коагуляционные системы происходит частичное разрушение их структуры, подтверждающееся уменьшением их эффективной вязкости. После прекращения механического воздействия структура этих систем частично восстанавливалась, на что указывал рост их эффективной вязкости. Таким образом, у майонезов, приготовленных на основе рафинированных растительных масел, было обнаружено свойство тиксотропии. При этом зависимости изменения эффективной вязкости от времени при механическом воздействии и после его устранения не совпадали друг с другом. То есть имеющий место эффект гистерезиса указывал на неполное восстановление структуры исследованных образцов после снятия механического воздействия. При изучении вязкости гетерогенных косметических композиций в работе [5] также было установлено существование эффекта гистерезиса.

Реологические исследования, нацеленные на изучение характера изменения структуры жидкого гомогенного состояния растительных масел при изменении гидродинамических условий, в научной литературе представлены в относительно небольшом количестве. Так результаты измерений эффективной вязкости, приведенные в работе [13], косвенно указывают на изменение структуры жидкого состояния исследованных пищевых растительных масел. Однако особенности изменения эффективной вязкости в интервале численных значений градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от 5 до 20 с^{-1} , подтверждающих образование новых состояний жидкой фазы, авторами статьи не анализировались. При этом характер полученных зависимостей объяснялся с позиций ньютоновской модели жидкого состояния растительных масел.

Экспериментальные данные, подтверждающие гипотезу об изменении структуры жидкого состояния гомогенных рафинированных подсолнечных масел при увеличении нагрузки в ротационном вискозиметре, были представлены в работах [20] и [21]. Оказалось, что при изменении градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от 1 до 200 с^{-1} в прямом направлении, а затем обратно конечная вязкость исследуемых образцов подсолнечного масла в сравнении с исходной вязкостью возрастала почти на 70%. Результаты измерения эффективной вязкости методом ротационной вискозиметрии и методом Гепплера отличались приблизительно на 10%. Разница численных значений эффективной вязкости может быть объяснена образованием более вязкой жидкой структуры в измерительной ячейке ротационного вискозиметра.

Таким образом, остаются актуальными реологические исследования устойчивости структурных состояний различных растительных масел. Например, нерафинированного подсолнечного высокоолеинового и линолевого типа, которые отличаются широким спектром концентраций содержащихся в них компонентов. Эта важная отличительная черта, наряду с их доступностью, позволяет использовать образцы этих масел в качестве исследовательских моделей состава более редких видов растительных масел.

Материалы, оборудование и методы исследования

Для реологических исследований были использованы промышленные образцы нерафинированных высокоолеинового подсолнечного масла и подсолнечного масла линолевого типа.

Жирнокислотный состав образцов был получен в соответствии с ГОСТ 31663-2012 при помощи капиллярного газо-жидкостного хроматографа Bruker–Scion 436-GC с использованием колонки $d = 0,25$ мм и ПЭГ в качестве активной фазы. Данные анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1. Жирнокислотный состав нерафинированных подсолнечных масел

Table 1. Fatty acid composition of unrefined edible vegetable oil

Название жирной кислоты	Условное обозначение	Высокоолеиновое подсолнечное масло, %	Подсолнечное масло линолевого типа, %
миристиновая	C 14:0	0,1	0,1
пальмитиновая	C 16:0	3,6	6,2
пальмитолеиновая	C16:1	0,2	0,1
стеариновая	C 18:0	1,9	3,3
олеиновая	C18:1	85,7	27,7
линолевая	C 18:2	6,9	61,2
линоленовая	C 18:3	–	0,1
арахиновая	C 20:0	0,3	0,3
гондоиновая	C 20:1	0,3	0,2
эйкозодиеновая	C 20:2	–	–
бегеновая	C 22:0	1,0	0,7
эруковая	C 22:1	–	–
лигноцериновая	C 24:0	–	0,1

Реологические исследования проводилось на ротационном вискозиметре Rheotest RN 4.1. Численные значения напряжения сдвига τ и эффективной вязкости $\mu_{эф}$ (коэффициента динамической вязкости μ) определялись программой прибора при изменении градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$ в интервале значений от 1 до 200 c^{-1} при температуре 25°C. Измерения проводились через каждые 10 секунд в течение 600 секунд для каждой скорости сдвига.

Методика проведения опытов включала в себя следующие операции. Исследуемый образец нерафинированного подсолнечного масла из пробосборника (герметичной колбы с крышкой) переливался в измерительную ячейку вискозиметра, которая далее термостатировалась. Измерения напряжения сдвига τ и эффективной вязкости $\mu_{эф}$ (коэффициента динамической вязкости μ) проводились для каждого из образцов последовательно сначала при возрастании градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от 1 до 200 c^{-1} , а затем при уменьшении градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от 200 до 1 c^{-1} . Далее без разгрузки ячейки, то есть без механического нарушения структуры слоя, проводились повторные измерения напряжения сдвига τ и эффективной вязкости $\mu_{эф}$ при возрастании скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от 1 до 10 c^{-1} . Затем исследуемый образец подсолнечного масла выливался из измерительной ячейки обратно в пробосборник и перемешивался при помощи встряхивания, то есть происходило механическое нарушение структуры слоя. После этого данный образец подсолнечного масла снова помещался в измерительную ячейку для измерения напряжения сдвига τ и эффективной вязкости $\mu_{эф}$ при возрастании скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от 1 до 10 c^{-1} .

На следующем этапе происходила повторная загрузка нового образца того же типа масла (для исключения окисления растительного масла) в измерительную ячейку и производилось измерение напряжения сдвига τ и эффективной вязкости $\mu_{эф}$ (коэффициента динамической вязкости μ) последовательно сначала при возрастании градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от 1 до 200 c^{-1} , а затем при уменьшении градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от 200 до 1 c^{-1} . После этого исследуемый образец оставляли в измерительной ячейке прибора. Через 12 ч снова проводили измерения напряжения сдвига τ и эффективной вязкости $\mu_{эф}$ при возрастании скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от 1 до 10 c^{-1} .

Результаты экспериментов и их обсуждение

По экспериментальным данным построены графические зависимости эффективной вязкости $\mu_{\text{эф}}$ (коэффициента динамической вязкости μ) от логарифма градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$, представленные на рисунках 1 и 2.

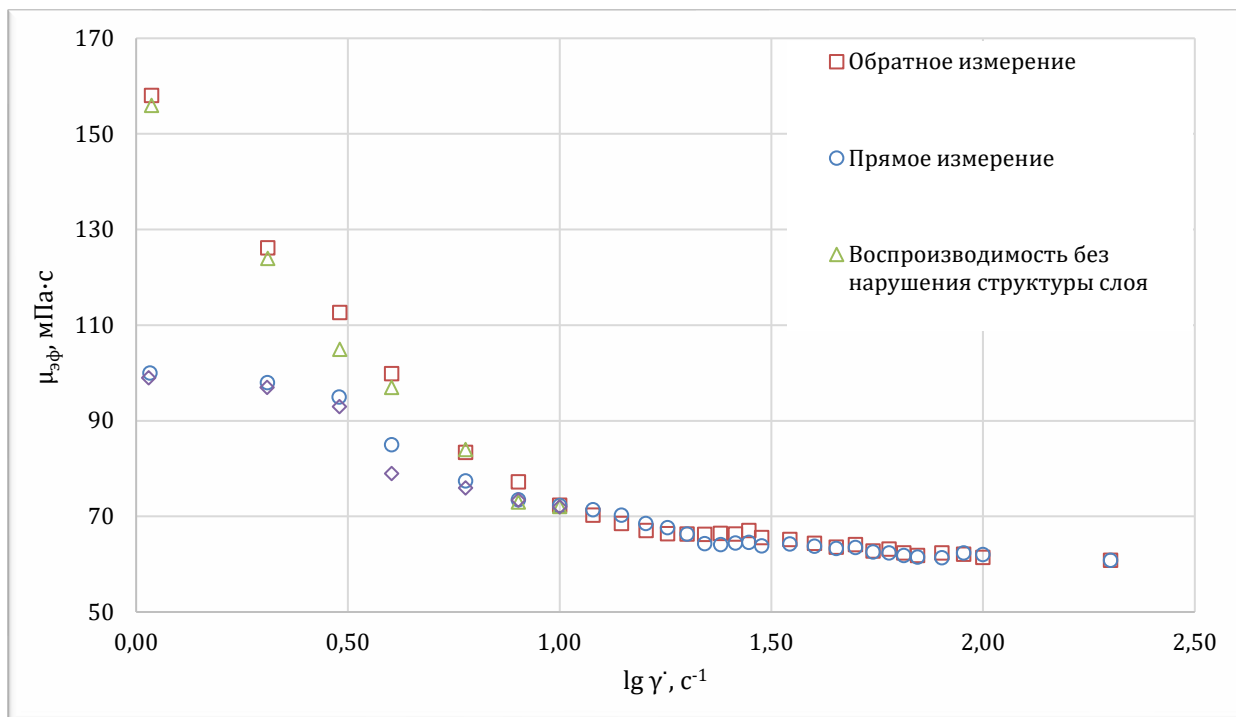


Рисунок 1 – Кривая вязкости нерафинированного высокоолеинового подсолнечного масла при температуре 25°C
Figure 1. Viscosity curve of unrefined high oleic sunflower oil at a temperature of 25°C

Согласно экспериментальным данным, представленным на рисунках 1 и 2, эффективная вязкость образцов нерафинированного высокоолеинового подсолнечного масла и нерафинированного подсолнечного масла линолевого типа при повышении градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от 1 до 20 c⁻¹ существенно снижается от значений приблизительно 100 и 90 мПа·с до приблизительно 70 и 60 мПа·с соответственно. При значениях градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$ более 100 c⁻¹ вязкость практически не изменяется, достигая при этом значений приблизительно 60 и 50 мПа·с соответственно. Иными словами, в данном случае вязкость образцов не зависит от градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$, а значит может быть названа динамической вязкостью μ . При последующем уменьшении градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от 200 до приблизительно 20 c⁻¹ результаты «прямой» и «обратной» нагрузок для обоих типов масел совпадают. Однако при дальнейшем уменьшении градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от 20 до 1 c⁻¹ численные значения эффективной вязкости резко возрастают, как для образца нерафинированного высокоолеинового подсолнечного масла, так и для образца нерафинированного подсолнечного масла линолевого типа. Максимальное значение эффективной вязкости для образца нерафинированного высокоолеинового подсолнечного масла достигает приблизительно 160 мПа·с, а для образца нерафинированного подсолнечного масла линолевого типа приблизительно 220 мПа·с. Такой характер реологических свойств указывает на формирование в ходе измерений «измененного жидкого состояния» нерафинированных подсолнечных масел с повышенной вязкостью по сравнению с жидким состоянием образцов, еще не подвергшихся воздействию в ячейке ротационного вискозиметра. Таким образом, как и в случае образцов одноименных рафинированных подсолнечных масел, исследованных в [21], на графиках 1 и 2 имеет место «эффект гистерезиса» при возрастающих и убывающих нагрузках.

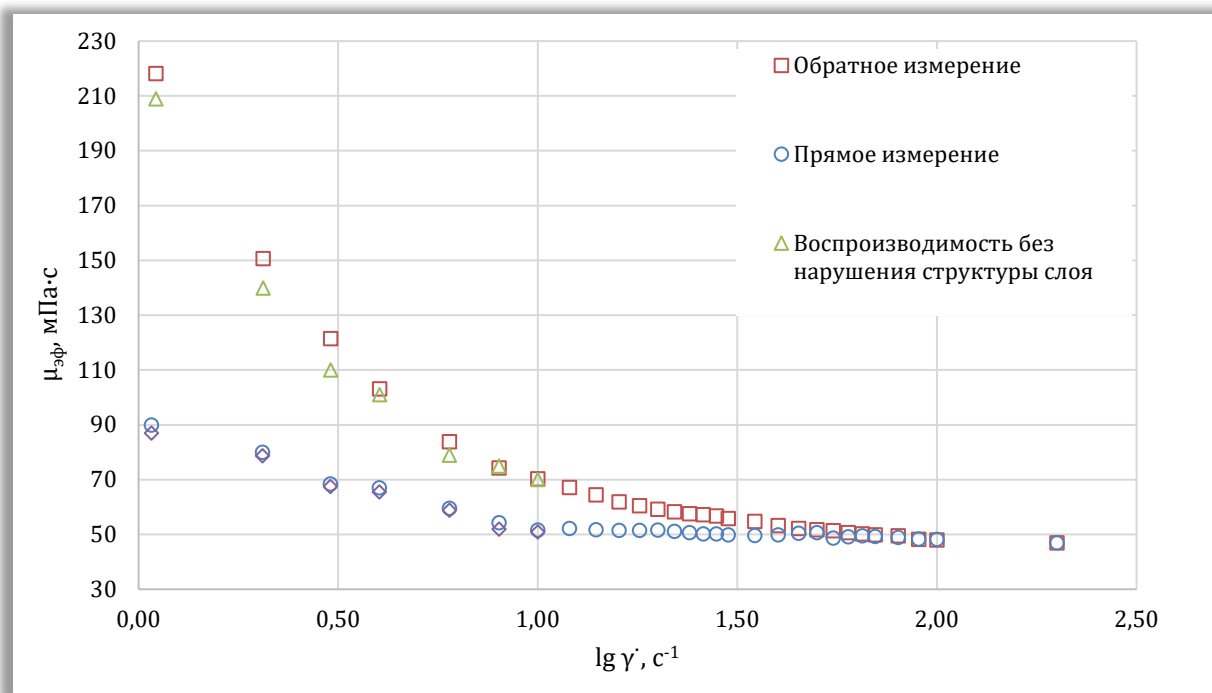


Рисунок 2 – Кривая вязкости нерафинированного подсолнечного масла линолевого типа при температуре 25°C
 Figure 2. Viscosity curve of unrefined linoleic sunflower oil at a temperature of 25°C

В случае проведения измерений эффективной вязкости на тех же самых образцах нерафинированных подсолнечных масел с «измененным жидким состоянием» в новом цикле возрастания нагрузок, без механического нарушения структуры слоя, при увеличении значений градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от 1 до 10 s^{-1} , численные значения эффективной вязкости для обоих образцов сохранили свои повышенные значения. Это указывает на относительную стабильность образцов с «измененным жидким состоянием» с повышенной вязкостью нерафинированных подсолнечных масел, которое формируется за счет динамического воздействия на первоначальную структуру жидкого состояния, обладающую меньшей вязкостью.

Данные по вязкости образцов, изменивших структуру жидкого состояния, полученные после их переливания в пробосборник, показывают, что после механического разнонаправленного перемешивания их вязкость приобрела первоначальное значение. Это указывает на то, что «измененное жидкое состояние» формируется в условиях однонаправленного перемещения различных слоев подсолнечного масла с различной скоростью друг относительно друга в измерительной ячейке ротационного вискозиметра. За счет этого повышается количество конформационных изомеров химических компонентов подсолнечных масел, структура которых обеспечивает увеличение силы Ван-дер-ваальсового взаимодействия.

Диапазон изменения градиента скорости сдвига для повторных измерений с механическим нарушением и без механического нарушения структуры слоя был выбран именно таким, поскольку значения, соответствующие $\dot{\gamma}$ от 1 до 10 s^{-1} , являются наиболее показательными.

Экспериментальные данные в исследовании [22] показывают, что состав и концентрация микрокомпонентов подсолнечных масел оказывает существенное влияние на их теплофизические и реологические свойства. В нерафинированных растительных маслах содержится значительно большее количество микрокомпонентов по сравнению с рафинированными растительными маслами. В связи с этим разница максимальных значений эффективной вязкости «измененного жидкого состояния» нерафинированных и рафинированных растительных масел одного вида, например подсолнечных, определяется не только составом и структурой их макрокомпонентов – триацилглицеринов, но и составом и структурой их микрокомпонентов – фосфатидов, стеридов, восков, моноацилглицеринов, диацилглицеринов и других.

В таблице 2 представлены данные об устойчивости образцов нерафинированных подсолнечных масел с «измененным жидким состоянием» в измерительной ячейке прибора. Измерения выполнены при отсутствии внешних разнонаправленных механических воздействий на исследуемые образцы.

Таблица 2. Эффективная вязкость исследованных образцов при 25°C
Table 2. Effective viscosity of the studied samples at 25°C

Градиент скорости сдвига $\dot{\gamma}$, с ⁻¹	Нерафинированное высокоолеиновое подсолнечное масло		Нерафинированное подсолнечное масло линолевого типа	
	эффективная вязкость при обратном измерении $\mu_{эф}$, мПа·с	эффективная вязкость при измерении спустя 12 ч $\mu_{эф}$, мПа·с	эффективная вязкость при обратном измерении $\mu_{эф}$, мПа·с	эффективная вязкость при измерении спустя 12 ч $\mu_{эф}$, мПа·с
1	158,1	156,1	218,2	212,1
2	126,2	124,3	150,7	145,5
3	112,7	107,1	121,5	115,6
4	99,9	97,3	103,2	101,4
6	83,4	84,7	83,9	79,9
8	77,2	73,9	74,4	75,3
10	72,4	72,1	70,4	70,1

Как видно из представленных в таблице 2 данных, структура «измененного жидкого состояния» исследованных образцов сохраняет устойчивость в течение 12 ч.

Заключение

Полученные данные подтверждают модель структуры «измененного жидкого состояния» подсолнечных масел, которое формируется в ходе измерений при увеличении градиента скорости сдвига в ячейке ротационного вискозиметра за счет образования конформационных изомеров различных компонентов подсолнечных масел, обладающих повышенной энергией внутримолекулярного взаимодействия. После прекращения внешнего однонаправленного механической воздействия конформационные изомеры «измененного жидкого состояния», обладающие повышенной энергией внутримолекулярного взаимодействия, в течение 12 ч сохраняют свою устойчивость. Однако нами выдвигается гипотеза, что при дальнейшем увеличении длительности «выдержки» образца в измерительной ячейке произойдет их возвращение к более устойчивым конформационным структурам с минимальной энергией внутримолекулярного взаимодействия за счет тепловой энергии.

Существующий массив экспериментальных данных о характере зависимости реологических свойств растительных масел от их макро- и микросостава пока не позволяет создать обобщенную теоретическую модель, распространив ее на широкий диапазон растительных масел. Для этого требуются дополнительные исследования. Однако полученные новые данные для образцов нерафинированного подсолнечного масла позволяют уже использовать их в теплогидравлических расчетах реальных процессов на всех стадиях производства и переработки. Важным замечанием является то, что следует использовать особенности однонаправленного и разнонаправленного перемешивания для организации наиболее выгодной гидродинамической обстановки внутри оборудования.

Литература

1. Civera C., Rivolta B., Otero R., Lúcio G., Canale L., Totten G. Study of residual stresses after steel quenching with vegetable oils. *23rd International Federation of Heat Treatment and Surface Engineering Congress 2016*. 2016, pp. 341–347.
2. Плесовских В. А., Безденежных А. А. Физико-химические и теплофизические свойства веществ и материалов мыловаренных и косметических производств (справочно-информационный сборник). М.: Пищепромиздат, 2001. 138 с.
3. Плесовских В. А., Дубовик О. А., Безденежных А. А. Физико-химия и технология производства мыла. СПб.: Химиздат, 2007. 336 с.

4. Rocha-filho P., Maruno M., Ferrari M., Topan J. Liquid crystal formation from sunflower oil: Long term stability studies. *Molecules*. 2016, V. 21, no. 6, article 680.
5. César F.C.S., Maia Campos P.M.B.G. Influence of vegetable oils in the rheology, texture profile and sensory properties of cosmetic formulations based on organogel. *International Journal of Cosmetic Science*. 2020, V. 42, pp. 494–500.
6. Toscano G., Riva G., Foppa Pedretti E., Duca D. Vegetable oil and fat viscosity forecast models based on iodine number and saponification number. *Biomass and Bioenergy*. 2012, V. 46, pp. 511–516.
7. Simencio-Otero R., Canale L., Totten G. Use of vegetable oils and animal oils as steel quenchants: A historical review – 1850–2010. *West Conshohocken, PA: ASTM International*. 2012, pp. 136–195.
8. Ferreira A.G.M., Egas A.P.V., Fonseca I.M.A., Costa A.C., Abreu D.C., Lobo L.Q. The viscosity of glycerol. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2017, V. 113, pp. 162–182.
9. Bandarkar F., Khattab I.S., Martinez F., Khoubnasabjafari M., Vahdati S., Jouyban A. Viscosity and surface tension of glycerol+ N-methyl-2-pyrrolidone mixtures from 293 to 323 K. *Physics and Chemistry of Liquids*. 2015, V. 53, no. 1, pp. 104–116.
10. Stanciu I. Regression models that describe sunflower oil dynamic viscosity of temperature absolute. *Chemistry*. 2014, V. 3, no. 4, pp. 53–54.
11. Stanciu I. Influence temperature and dynamic viscosity of rheological behavior for refined sunflower oil. *Indian Journal of Applied Research*. 2015, V. 5, pp. 40–41.
12. Deshpande V., Jyothi P.N. Experiment to determine the specific heat of oils. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*. 2021, V. 5, no. 1, pp. 47–52.
13. Santos J.C.O., Santos I.M.G., Souza A.G. Effect of heating and cooling on rheological parameters of edible vegetable oils. *Journal of Food Engineering*. 2005, V. 67, no. 4, pp. 401–405.
14. Yalcin H., Toker O.S., Dogan M. Effect of oil type and fatty acid composition on dynamic and steady shear rheology of vegetable oils. *Journal of Oleo Science*. 2012, V. 61, no. 4, pp. 181–187.
15. Rojas E.E.G., Coimbra J.S.R., Telis-Romero J. Thermophysical properties of cotton, canola, sunflower and soybean oils as a function of temperature. *International Journal of Food Properties*. 2013, V. 16, no. 7, pp. 1620–1629.
16. Ismail A.I., Shaker A.M. Quality characteristics of high-oleic sunflower oil extracted from some hybrids cultivated under Egyptian conditions. *Journal of Food Technology Research*. 2014, V. 1, no. 2, pp. 73–83.
17. Остриков А.Н., Клейменова Н.Л., Болгова И.Н., Копылов М.В. Исследование теплофизических и реологических свойств пищевых растительных масел // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 36–43.
18. Ребиндер П. А. Физико-химическая механика дисперсных структур: сборник статей. М: Наука, 1966. 130 с.
19. Шмидт А.А., Дудина З.А., Чекмарева И.Б. Производство майонеза. М.: Пищевая промышленность, 1976. 152 с.
20. Волков С.М., Мельник Г.Е., Федоров А.В., Новоселов А.Г., Федоров А.А., Ковальский И.С. Исследование зависимости динамики реологических свойств мисцелл высокоолеинового подсолнечного масла с различной концентрацией от температуры // Ползуновский вестник. 2019. № 1. С. 96–101.
21. Федоров А.В., Баранов И.В., Новоселов А.Г., Тамбулатова Е.В., Крылов В.А., Федоров А.А., Волков С.М., Лисицын А.Н. Исследование структурных состояний жидкой фазы пищевых растительных масел // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: сб. тр. СПб.: Изд-во Ун-та ИТМО, 2019. Т. II. С. 43–48.
22. Федоров А.В., Волков С.М., Мельник Г.Е., Новоселов А.Г., Федоров А.А. Сравнительный анализ методик реологических исследований на основе модели структурного состояния жидкой фазы подсолнечного масла // Вестник ВНИИЖ. 2019. № 19. С. 27–30.

References

1. Civera C., Rivolta B., Otero R., Lúcio G., Canale L., Totten G. Study of residual stresses after steel quenching with vegetable oils. *23rd International Federation of Heat Treatment and Surface Engineering Congress 2016*. 2016, pp. 341–347.
2. Plesovskikh V.A., Bezdenezhny`kh A.A. Physico-chemical and thermophysical properties of substances and materials of soap and cosmetic industries (reference and information collection). Moscow, Pishchepromizdat Publ., 2001. 138 p. (*In Russian*)
3. Plesovskikh V.A., Dubovik O.A., Bezdenezhnykh A.A. Physico-chemistry and technology of soap production. St. Petersburg, Himizdat Publ., 2007. 336 p. (*In Russian*)
4. Rocha-filho P., Maruno M., Ferrari M., Topan J. Liquid crystal formation from sunflower oil: Long term stability studies. *Molecules*. 2016, V. 21, no. 6, article 680.
5. César F.C.S., Maia Campos P.M.B.G. Influence of vegetable oils in the rheology, texture profile and sensory properties of cosmetic formulations based on organogel. *International Journal of Cosmetic Science*. 2020, V. 42, pp. 494–500.
6. Toscano G., Riva G., Foppa Pedretti E., Duca D. Vegetable oil and fat viscosity forecast models based on iodine number and saponification number. *Biomass and Bioenergy*. 2012, V. 46, pp. 511–516.

7. Simencio-Otero R., Canale L., Totten G. Use of vegetable oils and animal oils as steel quenchant: A historical review – 1850–2010. *West Conshohocken, PA: ASTM International*. 2012, pp. 136–195.
8. Ferreira A.G.M., Egas A.P.V., Fonseca I.M.A., Costa A.C., Abreu D.C., Lobo L.Q. The viscosity of glycerol. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2017, V. 113, pp. 162–182.
9. Bandarkar F., Khattab I.S., Martinez F., Khoubnasabjafari M., Vahdati S., Jouyban A. Viscosity and surface tension of glycerol+ N-methyl-2-pyrrolidone mixtures from 293 to 323 K. *Physics and Chemistry of Liquids*. 2015, V. 53, no. 1, pp. 104–116.
10. Stanciu I. Regression models that describe sunflower oil dynamic viscosity of temperature absolute. *Chemistry*. 2014, V. 3, no. 4, pp. 53–54.
11. Stanciu I. Influence temperature and dynamic viscosity of rheological behavior for refined sunflower oil. *Indian Journal of Applied Research*. 2015, V. 5, pp. 40–41.
12. Deshpande V., Jyothi P.N. Experiment to determine the specific heat of oils. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*. 2021, V. 5, no. 1, pp. 47–52.
13. Santos J.C.O., Santos I.M.G., Souza A.G. Effect of heating and cooling on rheological parameters of edible vegetable oils. *Journal of Food Engineering*. 2005, V. 67, no. 4, pp. 401–405.
14. Yalcin H., Toker O.S., Dogan M. Effect of oil type and fatty acid composition on dynamic and steady shear rheology of vegetable oils. *Journal of Oleo Science*. 2012, V. 61, no. 4, pp. 181–187.
15. Rojas E.E.G., Coimbra J.S.R., Telis-Romero J. Thermophysical properties of cotton, canola, sunflower and soybean oils as a function of temperature. *International Journal of Food Properties*. 2013, V. 16, no. 7, pp. 1620–1629.
16. Ismail A.I., Shaker A.M. Quality characteristics of high-oleic sunflower oil extracted from some hybrids cultivated under Egyptian conditions. *Journal of Food Technology Research*. 2014, V. 1, no. 2, pp. 73–83.
17. Ostrikov A.N., Kleimenova N.L., Bolgova I.N., Kopylov M.V. The research of thermophysical and rheological properties of edible vegetable oils. *Polzunovskiy vestnik*. 2021, no. 2, pp. 36–43. (In Russian)
18. Rebinder P.A. *Physico-chemical mechanics of disperse structures*. Moscow, Science Publ., 1966. 130 p. (In Russian)
19. Shmidt A.A., Dudina Z.A., Chekmareva I.B. *Mayonnaise production*. Moscow, Food industry Publ., 1976. 250 p. (In Russian)
20. Volkov S.M., Mel'nik G.E., Fedorov A.V., Novoselov A.G., Fedorov A.A., Koval'skij I.S. Investigation of the dependence of the dynamics of rheological properties of high oleic sunflower oil miscella with different concentrations on temperature. *Polzunovskii Vestnik*. 2019, V. 1, pp. 96–101. (In Russian)
21. Fedorov A.V., Baranov I.V., Novoselov A.G., Tambulatova E.V., Krylov V.A., Fedorov A.A., Volkov S.M., Lisitsyn A.N. Study of the structural states of the liquid phase of edible vegetable oils. *Refrigeration and Food Technologies in the 21st Century*. Collection of Works. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2019, V. 2, pp. 43–48. (In Russian)
22. Fedorov A.V., Volkov S.M., Mel'nik G.E., Novoselov A.G., Fedorov A.A. Comparative analysis of rheological research methods based on the model of the structural state of the liquid phase of sunflower oil. *Vestnik VNIIZh*. 2019, V.19, pp. 27–30. (In Russian)

Информация об авторах

Сергей Михайлович Волков – канд. хим. наук, старший научный сотрудник
Александр Валентинович Федоров – д-р техн. наук, доцент факультета биотехнологий
Александр Геннадьевич Новоселов – д-р техн. наук, профессор факультета биотехнологий
Алексей Александрович Федоров – аспирант факультета биотехнологий
Илья Абрамович Фридман – д-р техн. наук, профессор кафедры химической технологии лекарственных веществ
Николай Николаевич Романов – канд. техн. наук, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности

Information about the authors

Sergey M. Volkov, Ph. D., Senior researcher
Alexander V. Fedorov, D. Sc., Associate Professor of the Department of Biotechnology
Aleksander G. Novoselov, D. Sc., Professor of the Department of Biotechnology
Aleksey A. Fedorov, graduate student of the Department of Biotechnology
Ilya A. Fridman, D. Sc., Professor of the Department of Chemical Technology of Medicinal Products
Nikolay N. Romanov, Ph. D., Associate Professor of the Department of Physical and Technical Foundations of Fire Safety

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 22.10.2021
Одобрена после рецензирования 28.10.2021
Принята к публикации 30.10.2021

The article was submitted 22.10.2021
Approved after reviewing 28.10.2021
Accepted for publication 30.10.2021