

УДК 633.854.78
ББК 42.14
Р-40

Шорсткий Иван Александрович, аспирант кафедры факультета машиностроения и автосервиса ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет»; тел.: 8(861) 275-22-79;

Кошевой Евгений Пантелеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологического оборудования и систем жизнеобеспечения ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет»; 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, тел.: 8(861)275-22-79;

Косачев Вячеслав Степанович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет»; 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, тел.: 8(861)275-22-79;

Меретуков Заур Айдамирович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительных и общепрофессиональных дисциплин ФГБОУ ВПО «Майкопский государственный технологический университет», 385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191, тел.: 8(8772)52-55-34.

РЕОЛОГИЯ СУСПЕНЗИИ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА В ЭТАНОЛЕ (рецензирована)

Целью работы является анализ и определение реологических характеристик суспензии измельченных семян подсолнечника в этаноле для разрабатываемой «зеленой технологии» производства растительных масел.

Ключевые слова: семена подсолнечника, этанол, реология, подготовка сырья.

Shorstky Ivan Alexandrovich, post graduate student of the Faculty of Engineering and Service of FSBEI HPE «Kuban State Technological University»; tel.: 8 (861) 275-22-79;

Koshevoy Eugeniï Panteleevich, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Technological Equipment and Life Support Systems of FSBEI HPE «Kuban State Technological University», 350072, Krasnodar, 2 Moscow Str., tel.: 8 (861) 275-22-79;

Kosachev Vyacheslav Stepanovich, Doctor of Technical Sciences, professor, professor of the Department of Technological Equipment and Life Support Systems of FSBEI HPE «Kuban State Technological University», 350072, Krasnodar, 2 Moscow Str., tel.: 8 (861) 275-22-79;

Meretukov Zaur Aydamirovich, Doctor of Technical Sciences, associate professor, head of the Department of Construction and General Professional Disciplines of FSBEI HPE «Maikop State Technological University», 385000, the Republic of Adyghea, Maikop, 191 Pervomayskaya str., tel.: 8 (8772) 52-55-34.

RHEOLOGY OF THE SUSPENSION OF CRUSHED SUNFLOWER SEEDS IN ETHANOL (Reviewed)

The aim of the research has been the analysis and determination of rheological characteristics of the suspension of crushed sunflower seeds in ethanol for the developed «green technology» for the production of vegetable oils.

Keywords: sunflower seeds, ethanol, rheology, preparation of raw materials.

Связь между структурой и вязкостью дисперсных систем установлена в работах [1...5] с учетом особенностей неньютоновского течения суспензий на основе изменения их структуры, связанной с возникновением и разрушением агрегатов частиц. Известны также достаточно успешные попытки описать снижение вязкости с ростом скорости в

рамках моделей течения, где существование агрегатов не допускается [6]. До настоящего времени среди исследователей не существует единой точки зрения о механизме течения дисперсных систем, о чем свидетельствует обилие предлагаемых реологических моделей. Общая структурная особенность неньютоновских жидкостей состоит в присутствии единиц течения, размеры которых намного превышают размеры молекул жидкости. Таким образом, вязкая жидкость рассматривается как сплошная дисперсионная среда, а любые частицы – как дисперсная фаза. Ситуация осложняется тем, что частицы при взаимодействии между собой образуют некие агрегаты, группировки, т.е. система становится структурированной.

В экспериментальных исследованиях, выполненных на кафедре технологии жиров КубГТУ, динамическую вязкость измеряли на вискозиметре Brookfield LVDV-II производства Brookfield Engineering Laboratories (США). Методика эксперимента: исследуемый образец помещали в ячейку, снабженную «рубашкой», соединенной с термостатом, после чего в образец погружали шпиндель, диаметр которого соответствовал предполагаемому значению вязкости анализируемого образца. Измерения проводили при различных значениях скорости сдвига и температурах в нескольких повторностях. Заданные температуры образца контролировались при помощи датчика температуры.

Для определения зависимости вязкости (η) от скорости сдвига используем данные со спиртовой суспензией измельченных семян подсолнечника при различных скоростях сдвига в таблице 1 из нескольких повторностей минимальные и максимальные значения.

Таблица 1 - Вязкость спиртовой суспензии измельченных семян подсолнечника в зависимости от скорости сдвига

Скорость сдвига, 1/с	Вязкость, Па*с при 50% спирта 23⁰С	
	min	max
0,29	10,9	13,3
0,58	4,8	6,6
1,16	1,8	3,3
1,45	1	2
2,9	0,7	0,9
5,8	0,3	0,3
14,5	0,1	0,2
29	0,1	0,1
Скорость сдвига, 1/с	Вязкость, Па*с при 50% спирта 50⁰С	
	min	max
0,29	5,66	9,21
0,58	2,64	3,65
1,16	1,21	2
1,45	0,7	1,26
2,9	0,43	0,69
5,8	0,25	0,34
14,5	0,16	0,18
29	0,15	0,18
Скорость сдвига, 1/с	Вязкость, Па*с при 30% спирта 23⁰С	
	min	max
0,29	21,4	98,2
0,58	8,2	45,8
1,16	4,8	21,0

1,45	3,9	18,1
2,9	2,1	9,1
5,8	1,6	4,4
14,5	1,0	1,6
29	0,7	0,8

Для описания сдвигового течения дисперсных систем обычно используют функциональную зависимость между эффективной вязкостью (η), напряжением сдвига (τ) и скоростью сдвига ($\dot{\gamma}$), связанных между собой феноменологическим уравнением:

$$\tau^m = \tau_y^m + \eta^n \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

где τ_y – предельное напряжение сдвига.

Таким образом, большинство известных уравнений течения может быть получено из уравнения (1), выбором соответствующих показателей степеней (n) и (m) [7-9]. Учитывая степенную зависимость между этими показателями, экспериментальные данные были логарифмированы по вязкости в среде инженерных расчетов MathCAD:

$$\gamma := \begin{pmatrix} 0.29 \\ 0.58 \\ 1.16 \\ 1.45 \\ 2.9 \\ 5.8 \\ 14.5 \\ 29 \end{pmatrix} \cdot s^{-1} \quad \eta_{\min 3023} := \begin{pmatrix} 21.4 \\ 8.2 \\ 4.8 \\ 3.9 \\ 2.1 \\ 1.6 \\ 1.01 \\ 0.7 \end{pmatrix} \cdot \text{Pa} \cdot s \quad \eta_{\max 3023} := \begin{pmatrix} 98.2 \\ 45.8 \\ 21 \\ 18.1 \\ 9.1 \\ 4.4 \\ 1.6 \\ 0.8 \end{pmatrix} \cdot \text{Pa} \cdot s$$

$$L\eta_{\min 3023} := \ln \left[\frac{\eta_{\min 3023}}{(\text{Pa} \cdot s)} \right] = \begin{pmatrix} 3.0634 \\ 2.1041 \\ 1.5686 \\ 1.3610 \\ 0.7419 \\ 0.4700 \\ 0.0100 \\ -0.3567 \end{pmatrix} \quad L\eta_{\max 3023} := \ln \left[\frac{\eta_{\max 3023}}{(\text{Pa} \cdot s)} \right] = \begin{pmatrix} 4.5870 \\ 3.8243 \\ 3.0445 \\ 2.8959 \\ 2.2083 \\ 1.4816 \\ 0.4700 \\ -0.2231 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\eta_{\min 5023} := \begin{pmatrix} 10.9 \\ 4.8 \\ 1.8 \\ 1.01 \\ 0.7 \\ 0.299 \\ 0.1 \\ 0.09 \end{pmatrix} \cdot \text{Pa} \cdot s \quad \eta_{\max 5023} := \begin{pmatrix} 13.3 \\ 6.6 \\ 3.3 \\ 2 \\ 0.9 \\ 0.301 \\ 0.2 \\ 0.1 \end{pmatrix} \cdot \text{Pa} \cdot s$$

$$L\eta_{\min 5023} := \ln \left[\frac{\eta_{\min 5023}}{(\text{Pa} \cdot s)} \right] = \begin{pmatrix} 2.3888 \\ 1.5686 \\ 0.5878 \\ 0.0100 \\ -0.3567 \\ -1.2073 \\ -2.3026 \\ -2.4079 \end{pmatrix} \quad L\eta_{\max 5023} := \ln \left[\frac{\eta_{\max 5023}}{(\text{Pa} \cdot s)} \right] = \begin{pmatrix} 2.5878 \\ 1.8871 \\ 1.1939 \\ 0.6931 \\ -0.1054 \\ -1.2006 \\ -1.6094 \\ -2.3026 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\eta_{\min 5050} := \begin{pmatrix} 5.66 \\ 2.64 \\ 1.21 \\ 0.7 \\ 0.43 \\ 0.25 \\ 0.16 \\ 0.15 \end{pmatrix} \cdot \text{Pa} \cdot s \quad \eta_{\max 5050} := \begin{pmatrix} 9.21 \\ 3.65 \\ 2 \\ 1.26 \\ 0.69 \\ 0.34 \\ 0.181 \\ 0.18 \end{pmatrix} \cdot \text{Pa} \cdot s$$

$$L\eta_{\min 5050} := \ln \left[\frac{\eta_{\min 5050}}{(\text{Pa} \cdot s)} \right] = \begin{pmatrix} 1.7334 \\ 0.9708 \\ 0.1906 \\ -0.3567 \\ -0.844 \\ -1.3863 \\ -1.8326 \\ -1.8971 \end{pmatrix} \quad L\eta_{\max 5050} := \ln \left[\frac{\eta_{\max 5050}}{(\text{Pa} \cdot s)} \right] = \begin{pmatrix} 2.2203 \\ 1.2947 \\ 0.6931 \\ 0.2311 \\ -0.3711 \\ -1.0788 \\ -1.7093 \\ -1.7148 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Затем логарифмированные значения вязкости (2), (3) и (4) были аппроксимированы кубическими сплайнами:

$$L\eta_{\gamma 3023 \min} := \text{cspline}(\gamma, L\eta_{\min 3023}) \quad \eta_{s3023 \min}(\gamma) := \exp(\text{interp}(L\eta_{\gamma 3023 \min}, \gamma, L\eta_{\min 3023}, \gamma)) \cdot (\text{Pa} \cdot s) \quad (5)$$

$$L\eta_{\gamma 3023 \max} := \text{cspline}(\gamma, L\eta_{\max 3023}) \quad \eta_{s3023 \max}(\gamma) := \exp(\text{interp}(L\eta_{\gamma 3023 \max}, \gamma, L\eta_{\max 3023}, \gamma)) \cdot (\text{Pa} \cdot s) \quad (6)$$

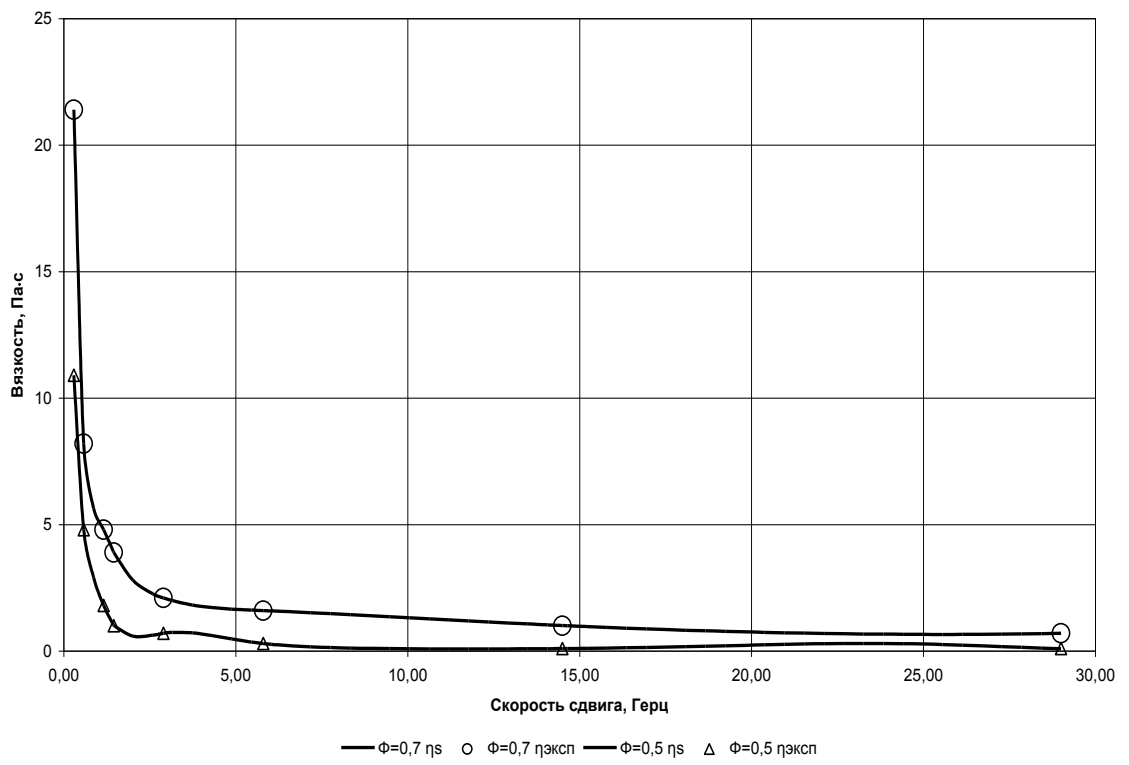
$$L\eta_{\gamma 5023 \min} := \text{cspline}(\gamma, L\eta_{\min 5023}) \quad \eta_{s5023 \min}(\gamma) := \exp(\text{interp}(L\eta_{\gamma 5023 \min}, \gamma, L\eta_{\min 5023}, \gamma)) \cdot (\text{Pa} \cdot s) \quad (7)$$

$$L\eta_{\gamma 5023 \max} := \text{cspline}(\gamma, L\eta_{\max 5023}) \quad \eta_{s5023 \max}(\gamma) := \exp(\text{interp}(L\eta_{\gamma 5023 \max}, \gamma, L\eta_{\max 5023}, \gamma)) \cdot (\text{Pa} \cdot s) \quad (8)$$

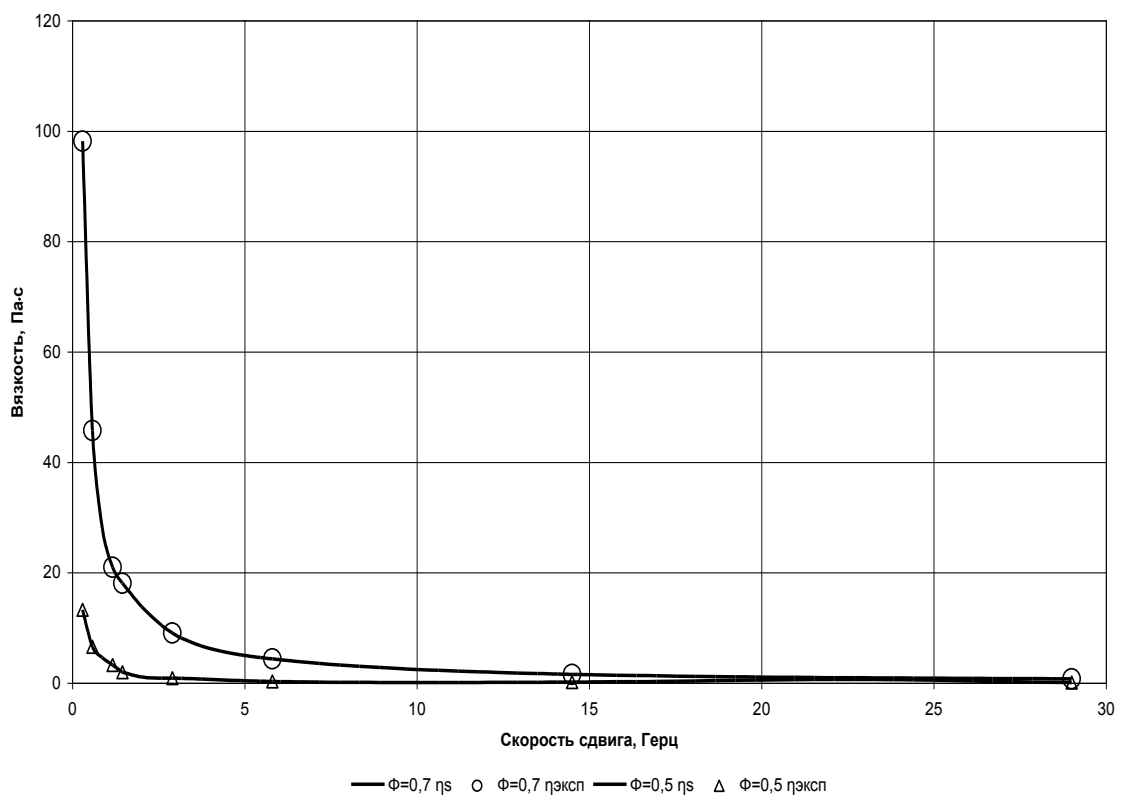
$$L\eta_{\gamma 5050 \min} := \text{cspline}(\gamma, L\eta_{\min 5050}) \quad \eta_{s5050 \min}(\gamma) := \exp(\text{interp}(L\eta_{\gamma 5050 \min}, \gamma, L\eta_{\min 5050}, \gamma)) \cdot (\text{Pa} \cdot s) \quad (9)$$

$$L\eta_{\gamma 5050 \max} := \text{cspline}(\gamma, L\eta_{\max 5050}) \quad \eta_{s5050 \max}(\gamma) := \exp(\text{interp}(L\eta_{\gamma 5050 \max}, \gamma, L\eta_{\max 5050}, \gamma)) \cdot (\text{Pa} \cdot s) \quad (10)$$

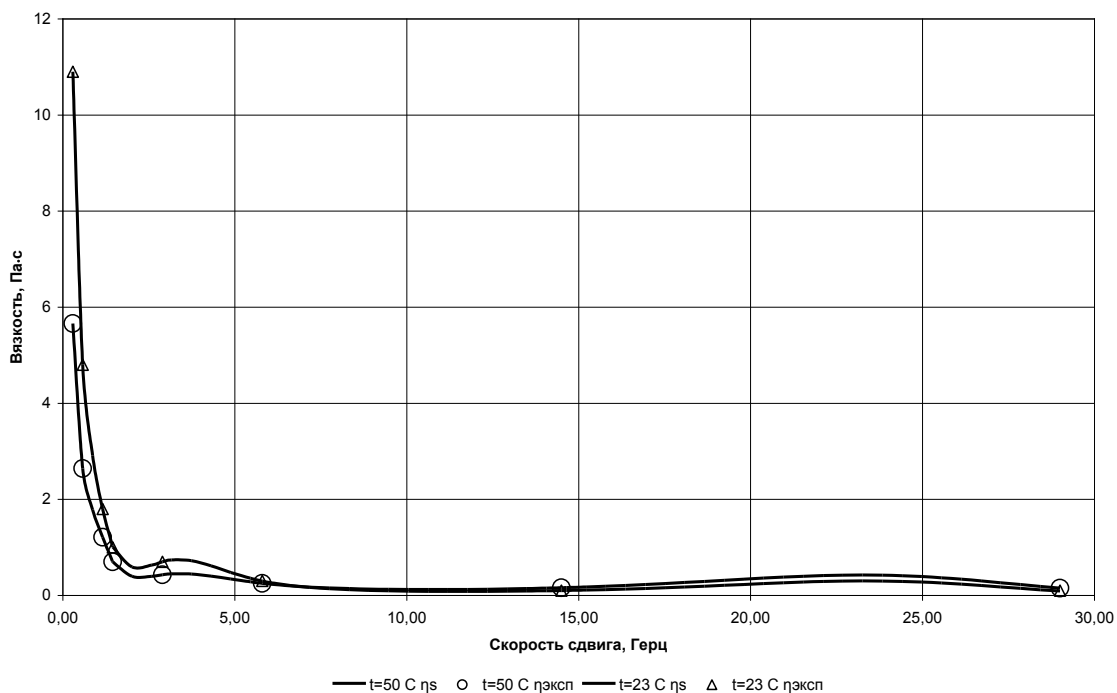
Что позволило получить гладкую функциональную зависимость вязкости от скорости сдвига в широком диапазоне этих скоростей (5) ... (10). Качество полученных сплайн аппроксимаций наглядно представлено в виде следующих графических зависимостей.



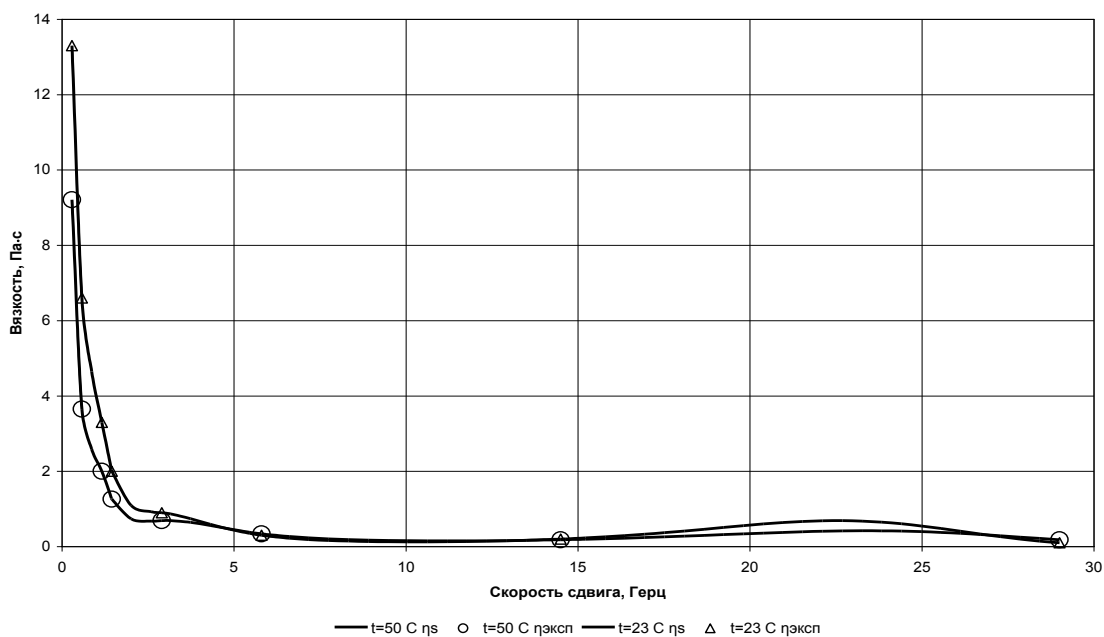
а



б



В



Г

Рисунок 1. Функциональные зависимости вязкости от скорости сдвига и температуры: а) min при изменении концентрации при 23⁰С; б) max при изменении концентрации при 23⁰С; в) min при изменении температуры при 50%; г) max при изменении температуры при 50%

Значение предельного напряжения сдвига τ_y определяли по функциональным зависимостям вязкости от скорости сдвига, используя известную формулу, связывающую эффективную вязкость, напряжение и скорость сдвига:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (11)$$

Используя гладкую функциональную зависимость вязкости от скорости сдвига в широком диапазоне этих скоростей, на основе полученных сплайн аппроксимаций определили зависимость напряжения сдвига по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 \tau_{s3023min}(\gamma) &:= \overline{\left(\eta_{s3023min}(\gamma) \cdot \dot{\gamma} \right)} \\
 \tau_{s3023max}(\gamma) &:= \overline{\left(\eta_{s3023max}(\gamma) \cdot \dot{\gamma} \right)} \\
 \tau_{s5023min}(\gamma) &:= \overline{\left(\eta_{s5023min}(\gamma) \cdot \dot{\gamma} \right)} \\
 \tau_{s5023max}(\gamma) &:= \overline{\left(\eta_{s5023max}(\gamma) \cdot \dot{\gamma} \right)} \\
 \tau_{s5050min}(\gamma) &:= \overline{\left(\eta_{s5050min}(\gamma) \cdot \dot{\gamma} \right)} \\
 \tau_{s5050max}(\gamma) &:= \overline{\left(\eta_{s5050max}(\gamma) \cdot \dot{\gamma} \right)}
 \end{aligned} \tag{12}$$

где τ_s , η_s – соответствующие сплайн интерполяции напряжения сдвига и вязкости, полученные по экспериментальным данным.

Используя непрерывную аппроксимацию исходной функции заданной аналитическим выражением (1) при построении аппроксимирующей функции возможно требовать минимальности отклонения функций (12) от функции (1) на непрерывном множестве точек скоростей сдвига от $0,29 \text{ сек}^{-1}$ до 29 сек^{-1} . Такой интегральный вид аппроксимации позволяет для наилучшего приближения требовать, чтобы во всех точках некоторого отрезка отклонения аппроксимирующей функции от функции было по абсолютной величине меньше заданной величины, так называемого среднеквадратичного приближение, для которого наименьшее значение имеет величина:

$$\begin{aligned}
 Z_{3023}(n, \tau_y, m) &:= \int_{\gamma_0}^{\gamma_7} \left[\frac{\left(\frac{\tau_{s3023min}(\gamma)}{\text{Pa}} \right)^m - \left[(\tau_y)^m + \left[\frac{\eta_{s3023min}(\gamma)}{(\text{Pa} \cdot \text{s})} \right]^n \cdot \left(\frac{\dot{\gamma}}{\text{Hz}} \right)^n \right]^2}{\left(\frac{\tau_{s3023min}(\gamma)}{\text{Pa}} \right)^m} \right]^2 d\gamma \dots \\
 &+ \int_{\gamma_0}^{\gamma_7} \left[\frac{\left(\frac{\tau_{s3023max}(\gamma)}{\text{Pa}} \right)^m - \left[(\tau_y)^m + \left[\frac{\eta_{s3023max}(\gamma)}{(\text{Pa} \cdot \text{s})} \right]^n \cdot \left(\frac{\dot{\gamma}}{\text{Hz}} \right)^n \right]^2}{\left(\frac{\tau_{s3023max}(\gamma)}{\text{Pa}} \right)^m} \right]^2 d\gamma
 \end{aligned} \tag{13}$$

Целевая функция (13) позволяет определить функциональную зависимость между эффективной вязкостью (η), напряжением сдвига (τ) и скоростью сдвига ($\dot{\gamma}$), определяя τ_y – предельное напряжение сдвига в виде степенной зависимости с показателями степеней при соответствующих величинах напряжения сдвига (τ) – m и скоростью сдвига ($\dot{\gamma}$) – n . В этом случае функция (1) равномерно приближает функции $\tau_{s3023max}$ и $\tau_{s3023min}$ на интервале скоростей сдвига от $0,29 \text{ сек}^{-1}$ до 29 сек^{-1} . Потребовав обращения в нуль частных производных целевой функции (13) по параметрам n , τ_y , m определяющим функцию (1), получили уравнения, позволяющие найти наилучшие (в указанном смысле) значения этих параметров:

$$\begin{aligned}
 \text{Given} \\
 dZ_{n3023}(n, \tau_y, m) = 0 \qquad dZ_{\tau3023}(n, \tau_y, m) = 0 \qquad dZ_{m3023}(n, \tau_y, m) = 0 \\
 \text{Find}(n, \tau_y, m) = \left(\begin{array}{l} 6.898439977135225 \\ 0.7959534358385849 \\ 6.898439997843984 \end{array} \right)
 \end{aligned} \tag{14}$$

где dZ_{n3023} , $dZ_{\tau3023}$, dZ_{m3023} – частные производные целевой функции (13), которые обращаются в ноль по параметрам $n = 6,8984$, $\tau_y = 0,7960$, $m = 6,8984$ (условие экстремума).

В дальнейшем найденные значения использовали как начальные приближения для определения минимумов целевых функций:

$$Z_{5023}(n, \tau_y, m) := \int_{\gamma_0}^{\gamma_7} \left[\frac{\left(\frac{\tau_{s5023min}(\gamma)}{Pa} \right)^m - \left[(\tau_y)^m + \left[\frac{\eta_{s5023min}(\gamma)}{(Pa \cdot s)} \right]^n \cdot \left(\frac{\gamma}{Hz} \right)^n \right]}{\left(\frac{\tau_{s5023min}(\gamma)}{Pa} \right)^m} \right]^2 d\gamma \dots \quad (15)$$

$$+ \int_{\gamma_0}^{\gamma_7} \left[\frac{\left(\frac{\tau_{s5023max}(\gamma)}{Pa} \right)^m - \left[(\tau_y)^m + \left[\frac{\eta_{s5023max}(\gamma)}{(Pa \cdot s)} \right]^n \cdot \left(\frac{\gamma}{Hz} \right)^n \right]}{\left(\frac{\tau_{s5023max}(\gamma)}{Pa} \right)^m} \right]^2 d\gamma$$

$$Z_{5050}(n, \tau_y, m) := \int_{\gamma_0}^{\gamma_7} \left[\frac{\left(\frac{\tau_{s5050min}(\gamma)}{Pa} \right)^m - \left[(\tau_y)^m + \left[\frac{\eta_{s5050min}(\gamma)}{(Pa \cdot s)} \right]^n \cdot \left(\frac{\gamma}{Hz} \right)^n \right]}{\left(\frac{\tau_{s5050min}(\gamma)}{Pa} \right)^m} \right]^2 d\gamma \dots \quad (16)$$

$$+ \int_{\gamma_0}^{\gamma_7} \left[\frac{\left(\frac{\tau_{s5050max}(\gamma)}{Pa} \right)^m - \left[(\tau_y)^m + \left[\frac{\eta_{s5050max}(\gamma)}{(Pa \cdot s)} \right]^n \cdot \left(\frac{\gamma}{Hz} \right)^n \right]}{\left(\frac{\tau_{s5050max}(\gamma)}{Pa} \right)^m} \right]^2 d\gamma$$

где Z_{5023} , Z_{5050} – целевые функции аппроксимации уравнения (1) при 50% спирта, 23⁰С и 50⁰С соответственно.

Минимизируя целевые функции (13), (15) и (16) по параметрам, получили следующие квадратичные оценки (таблица 2).

Таблица 2 - Параметры уравнения (1) для спиртовой суспензии измельченных семян подсолнечника в зависимости от концентрации спирта и температуры

Концентрация спирта, %	Температура, ⁰ С	n	τ_y	m
30	23	6,8984	0,7960	6,8984
50	23	2,3823	0,0098	2,3823
50	50	7,3414	0,2805	7,3414

Регрессионный анализ данных этой аппроксимации позволил получить линейные регрессионные уравнения (17), (18) параметров уравнения (1) относительно концентрации спирта и температуры спиртовой суспензии измельченных семян подсолнечника.

$$n(\varphi, t) = m(\varphi, t) = 9.4481 - 0.2258 \cdot \varphi + 0.1837 \cdot t \quad (17)$$

$$\tau_y(\varphi, t) = 1.7447 - 0.0393 \cdot \varphi + 0.01 \cdot t \quad (18)$$

Как видно из представленных данных (17), (18) изменения концентрации спирта в суспензии (φ , %) и температуры (t , ⁰С) оказывают существенное влияние на реологические характеристики спиртовой суспензии измельченных семян подсолнечника. Следовательно, найденные регрессионные уравнения необходимо учитывать для расчета течения этой суспензии. Подставляя найденные значения (17),

(18) в уравнение (1) получим с учетом (12) следующую обобщенную реологическую характеристику спиртовой суспензии измельченных семян подсолнечника:

$$\tau(\gamma, \varphi, t) = (1.7447 - 0.0393 \cdot \varphi + 0.01 \cdot t) \cdot \left((9.4481 - 0.2258 \cdot \varphi + 0.1837 \cdot t) \cdot \eta_{sMin}(\gamma, \varphi, t) + \eta_{sMax}(\gamma, \varphi, t) \right) \quad (19)$$

где

$$\eta_{sMin}(\gamma, \varphi, t) := \frac{\eta_{s3023min}(\gamma) - \eta_{s5023min}(\gamma)}{30 - 50} \cdot \varphi + \frac{\eta_{s5023min}(\gamma) - \eta_{s5050min}(\gamma)}{23 - 50} \cdot t + \frac{30 \cdot \eta_{s5050min}(\gamma) - 50 \cdot \eta_{s3023min}(\gamma) + 50 \cdot \eta_{s5023min}(\gamma) - 50 \cdot \eta_{s5050min}(\gamma)}{30 - 50} - \frac{50 \cdot \eta_{s5023min}(\gamma) - 50 \cdot \eta_{s5050min}(\gamma)}{23 - 50} \quad (20)$$

$$\eta_{sMax}(\gamma, \varphi, t) := \frac{\eta_{s3023max}(\gamma) - \eta_{s5023max}(\gamma)}{30 - 50} \cdot \varphi + \frac{\eta_{s5023max}(\gamma) - \eta_{s5050max}(\gamma)}{23 - 50} \cdot t + \frac{30 \cdot \eta_{s5050max}(\gamma) - 50 \cdot \eta_{s3023max}(\gamma) + 50 \cdot \eta_{s5023max}(\gamma) - 50 \cdot \eta_{s5050max}(\gamma)}{30 - 50} - \frac{50 \cdot \eta_{s5023max}(\gamma) - 50 \cdot \eta_{s5050max}(\gamma)}{23 - 50}$$

Таким образом, получена зависимость напряжения сдвига спиртовой суспензии измельченных семян подсолнечника от скорости сдвига, концентрации спирта и температуры этой суспензии.

Выводы

Использование кубических сплайнов (5)...(10) позволяет описать экспериментальные данные в широком диапазоне скоростей сдвига, температур и концентраций фаз в виде гладких функциональных зависимостей (20) и (20), что делает возможным их дальнейшее использование как для изучения структурированности спиртовой суспензии измельченных семян подсолнечника, так и для инженерных расчетов реологии течения этой системы.

Подтверждение

Данная работа выполнена по федеральной целевой программе «Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проект) RFMEF157714X0046.

Литература:

1. Бибик Е.Е. Реология дисперсных систем: монография. Л., 1981. 172 с.
2. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. СПб., 2007. 560 с.
3. Матвеев В.Н., Кирсанов Е.А. Вязкость и структура дисперсных систем // Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия. 2011. Т. 52, №4. С. 243-276.
4. Методы решения дифференциальных уравнений гидродинамики / З.А. Меретуков [и др.] // Новые технологии. 2012. Вып. 1. С. 36-41.
5. Мошев В.В., Иванов В.А. Реологическое поведение концентрированных неньютоновских суспензий. М., 1990. 88 с.
6. Овчинников П.Ф., Круглицкий Н.Н., Михайлов Н.В. Реология тиксотопных систем. Киев, 1972. 122 с.
7. Урьев Н.Б., Потанин А.А. Текучесть суспензий и порошков. М., 1992. 256 с.
8. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. М., 1988. 256 с.
9. International Congress on Green Extraction of Natural Products. GENP L F Avignon, France, 2013. April. P. 16-17.

References:

1. Bibik E.E. *Rheology of disperse systems*, L., 1981. 172 p.
2. Malkin A.J., Isayev A.I. *Rheology: concepts, methods, and applications*. SPb., 2007. 560 p.
3. Matveenko V.N., Kirsanov E.A. *Viscosity and structure of the dispersed systems*// *Bulletin of MSU. Ser.2. Chemistry. 2011. V. 52. No 4. P. 243-276.*

4. *Methods for solving differential equations of hydrodynamics/ Meretukov Z.A. [and oth.] //New technologies. Maikop, 2012. № 1. P. 36-41.*
5. *Moshev V.V., Ivanov V.A. Rheological behavior of concentrated Non-Newtonian suspensions. M., 1990.88 p.*
6. *Ovchinnikov P. F., Kruglitsky N.N., Mikhailov N.V. Rheology of thixotropic systems. Kiev, 1972.122 p.*
7. *Uriev N.B., Potanin A.A. Fluidity of suspensions and powders. M., 1992. 256 p.*
8. *Uriev N.B. Physical and chemical bases of technology of disperse systems and materials. M., 1988.256 p.*
9. *International Congress on Green Extraction of Natural Products. GENP F Avignon, France, 2013. April. P. 16-17.*