

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПИЩЕВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

С.М. Волков, А.Г. Новоселов, А.В. Федоров, Б.А. Кулишов, А.А. Федоров

*В статье говорится о пищевых растительных маслах (ПРМ), сложной многокомпонентной структуре. Содержание одних и тех же компонентов в некоторых одноимённых растительных маслах может отличаться на сотни процентов. Изменение концентрации одинаковых компонентов в растительных маслах, в том числе одноимённых, неизбежно связано с изменением численных значений физических свойств ПРМ. Одним из таких физических свойств является динамическая вязкость. Анализ имеющихся реологических данных для ПРМ показал, что разработка методики системных исследований динамической вязкости растительных масел на современном исследовательском оборудовании, а также моделирование структурно-реологических свойств растительных масел по-прежнему являются актуальными задачами. Целью работы являлось определение структурно-реологической модели пищевых растительных масел. Для достижения поставленной цели были проведены реологические исследования модельных ПРМ методом ротационной вискозиметрии. В результате проведенных реологических исследований для ПРМ была обоснована модель «псевдопластичной жидкости».*

*Ключевые слова: реология, моделирование, пищевые растительные масла, псевдопластичная жидкость, подсолнечное масло, высокоолеиновое подсолнечное масло, оливковое масло.*

Пищевые растительные масла (ПРМ) – важнейший для человеческого организма источник энергии и питательных веществ, в том числе, незаменимых полиненасыщенных жирных кислот. ПРМ представляют собой, многокомпонентную смесь, состоящую из взаимодействующих между собой органических, неорганических и металлоорганических соединений, которые при изменении температуры могут менять свою структуру и агрегатное состояние. ПРМ почти на 90% состоят из взаимно растворимых триацилглицеридов различного состава, в структуре которых распределены в незначительных количествах такие важные для человеческого организма биологически активные вещества как, например, фосфолипиды, свободные жирные кислоты, воски и воскоподобные вещества, стиролы, сахара, токоферолы, вода, белки, а также большое количество иных веществ [1,8,10]. Причем, в растительных маслах одного и того же вида может изменяться как набор составляющих его компонентов, так и их относительное содержание в зависимости от региона произрастания масличных растений, климатических условий, а также технологии производства ПРМ. Содержание одних и тех же компонентов в некоторых одноимённых растительных маслах может отличаться на сотни процентов. Вариативность состава ПРМ учтена в нормативной документации, регламентирующей их показатели качества [2,3].

Изменение концентрации одинаковых компонентов в растительных маслах, в том числе одноимённых, неизбежно связано с изменением численных значений физических свойств ПРМ. Наибольший интерес вызывают исследования вязкости ПРМ в широком диапазоне реодинамических параметров, температурных условий, а также режимов технологической обработки. Особенности изменений одной из наиболее важных физических величин – динамической вязкости  $\mu$ , связанной как с молекулярной структурой фазовых компонентов, так и с характером структурирования всей многокомпонентной системы для различных видов ПРМ, в настоящее время изучены недостаточно и имеют фрагментарный характер.

Для получения численных значений реодинамических характеристик структурированных жидкостей наиболее эффективным методом является ротационная вискозиметрия, которая давно хорошо известна и методически отработана [4,5]. Системный подход, для получения данных о характере изменений динамической вязкости  $\mu$  различных видов ПРМ от температуры, режимов нагревания и охлаждения, а так же от их химического состава, был применен в работе [6]. В этой работе качественный состав каждого из образцов ПРМ, охарактеризован суммарным составом насы-

ценных жирных кислот (НЖК), мононенасыщенных жирных кислот (МНЖК) и полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) без указания технологии получения этих ПРМ. Была изучена зависимость коэффициентов динамической вязкости  $\mu$  от градиентов скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  для различных температур в интервале  $\dot{\gamma} = 0 \div 70 \text{ с}^{-1}$ , в том числе при воздействии окислителей и антиоксидантов. Зависимость коэффициентов динамической вязкости от температуры для различных видов ПРМ, авторы работы [6] исследовали при значении градиента сдвига  $\dot{\gamma} = 68 \text{ с}^{-1}$ . Со ссылкой на [7] они отметили, что ньютоновское течение модельных смесей триглицеридов наблюдалось при градиентах сдвига, начиная от  $\dot{\gamma} = 10 \text{ с}^{-1}$ . При этом, ссылаясь на численные значения графика функции  $\mu = f(\dot{\gamma})$ , представленном на рис.1 [6], авторы сделали вывод, что в динамическом режиме растительные масла могут быть классифицированы как неньютоновские жидкости, проявляющие свойства бингамовских жидкостей. Проведённые ранее, например, в [4,5] исследования структурированных жидкостей на основе ПРМ, а так же приведённые данные [11] показали, что только полные кривые течения жидкости, а именно, функции  $\tau = f(\dot{\gamma})$  для различных ПРМ, являются объективной основой для интерпретации результатов экспериментальных исследований на соответствие одной из моделей течения неньютоновских жидкостей.

Однако в работе [6] не представлены табличные данные функций  $\tau = f(\dot{\gamma})$  для построения полных реологических кривых исследованных ПРМ, которые могли бы подтвердить адекватность экспериментальных данных выбранной ими модели бингамовской жидкости. Более того, согласно графику зависимости коэффициента динамической вязкости от градиента скорости сдвига, представленному на рис.1 работы [6], видно, что значения коэффициента динамической вязкости закономерным образом проходят минимум в интервале значений градиента сдвига приблизительно  $\dot{\gamma} = 5 \div 10 \text{ с}^{-1}$ , после этого - незначительно повышаются, а затем в интервале значений градиента сдвига  $\dot{\gamma} = 10 \div 70 \text{ с}^{-1}$ , - снова уменьшаются. При этом на рис. 5 этой же работы представлен график функции  $\tau = f(\dot{\gamma})$  для подвергшихся незначительной обработке растительных масел, который выходит из начала координат. Такое изменение реологических свойств ПРМ, исследованных в работе [6], согласно [11], не является характерным для модели бингамовской жидкости.

Кроме того, сравнение численных значений коэффициентов динамической вязкости

подсолнечного и оливкового масел при температуре  $25^\circ\text{C}$ , представленных в работе [6], с данными в отечественной специальной литературе [8,9] для различных технологий получения ПРМ показывает, что коэффициенты динамической вязкости при одной и той же температуре для этих растительных масел в работе [6] имеют численные значения, которые примерно на  $5 \div 10\%$  превышают данные, представленные в работах [8,9].

Таким образом, анализ имеющихся реологических данных для ПРМ показал, что разработка методики системных исследований динамической вязкости растительных масел на современном исследовательском оборудовании, а также моделирование структурно-реологических свойств растительных масел по-прежнему являются актуальными задачами.

На первом этапе реализации программы системных исследований структурно-реологических свойств ПРМ, по нашему мнению, необходим более глубокий анализ функции  $\tau = f(\dot{\gamma})$ . Это необходимо для более адекватного обоснования модели режима течения ПРМ. Из рис. 1 работы [6] следует, что численные значения коэффициентов динамической вязкости в интервале значений градиента сдвига  $\dot{\gamma} = 0 \div 70 \text{ с}^{-1}$  в целом имеют тенденцию к уменьшению, не достигая при этом своего относительно минимального значения. Таким образом, определение интервала значений градиента сдвига  $\dot{\gamma}$ , при котором коэффициент динамической вязкости  $\mu$  достигает своего относительного минимального значения, является первостепенной задачей. Это позволило бы уточнить характер полной реологической кривой ПРМ на всём её протяжении в интервале значений градиента сдвига  $\dot{\gamma}$ , начиная от минимального значения  $\dot{\gamma}$ , определяемого чувствительностью измерительной техники, и кончая максимальным значением  $\dot{\gamma}$ , которое должно определяться либо по достижении постоянства коэффициента динамической вязкости  $\mu$ , либо по достижении минимальных значений показателей относительного изменения коэффициента динамической вязкости,  $(\Delta\mu/\Delta\dot{\gamma})$  или  $(\Delta\mu/\Delta\dot{\tau})$ , в заданных интервалах значений  $\Delta\dot{\gamma}$  или  $\Delta\dot{\tau}$  соответственно. Причём важное значение имеет как численное значение величин  $(\Delta\mu/\Delta\dot{\gamma})$  или  $(\Delta\mu/\Delta\dot{\tau})$ , так их знак, который указывает на характер изменения коэффициента динамической вязкости  $\mu$  в различных типах моделей неньютоновских жидкостей [11]. При этом, как показано в [5], более адекватным является анализ функции  $\mu =$

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПИЩЕВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

$f(\tau)$ , а так же величины относительного изменения коэффициента динамической вязкости  $(\Delta\mu/\Delta\tau)$ . Экспериментальные данные численных значений  $\mu$ , градиента скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , напряжения сдвига  $\tau$  и относительного изменения динамической вязкости  $(\Delta\mu/\Delta\tau)$  в заданных интервалах значений  $\dot{\gamma}$ , должны быть представлены в табличной форме для более надёжного обоснования выбора из нескольких возможных наиболее подходящей модели неньютоновских жидкостей. Определённая таким образом реологическая модель ПРМ должна не только объяснять полученные экспериментальные результаты, в том числе, возникновение различных структурных организаций жидкой фазы ПРМ при различных режимах течения, которые могут иметь место при взаимодействии между собой триглицеридов и других компонентов растительных масел, но и уже имеющиеся литературные данные.

Таким образом, для дальнейшего более глубокого исследования характера влияния состава ПРМ на коэффициент динамической вязкости уже на начальном этапе выполнения программы реологических исследований необходима детализация жирнокислотного состава триглицеридов в изучаемых образцах растительных масел, а также сведения о технологии производства этих растительных масел.

В качестве модельных объектов для структурно-реологических исследований нами были выбраны ПРМ, полученные по различным технологиям, а именно, нерафинированные: высокоолеиновое подсолнечное масло; подсолнечное масло линолевого типа; оливковое масло; а также рафинированные: высокоолеиновое подсолнечное масло, подсолнечное масло линолевого типа, оливковое масло.

Жирнокислотный состав исследованных образцов растительных масел представлен в таблицах 1 и 2.

Образец 1-1 – нерафинированное высокоолеиновое подсолнечное масло; образец 1-2 – нерафинированное подсолнечное масло линолевого типа; образец 1-3 – нерафинированное оливковое масло.

Образец 2-1 – рафинированное высокоолеиновое подсолнечное масло; образец 2-2 – рафинированное подсолнечное масло линолевого типа; образец 2-3 – рафинированное оливковое масло.

Условные обозначения жирных кислот указывают на количество атомов углерода в жирных кислотах и число двойных связей.

Таблица 1. Жирнокислотный состав нерафинированных растительных масел.

Название жирной кислоты	Усл. обозн.	Обр. 1-1	Обр. 1-2	Обр. 1-3
		%	%	%
Пальмитиновая	C 16:0	3,0	5,7	11,3
Стеариновая	C 18:0	2,0	3,4	2,2
Олеиновая	C 18:1	87,8	25,5	78,3
Линолевая	C 18:2	6,3	64,6	6,9
Линоленовая	C 18:3	-	-	0,3
Арахидиновая	C 20:0	0,1	0,1	0,5
Гондоиновая	C 20:1	-	-	0,3
Бегеновая	C 22:0	0,8	0,8	0,2

Таблица 2. Жирнокислотный состав рафинированных растительных масел.

Название жирной кислоты	Усл. обозн.	Обр. 2-1	Обр. 2-2	Обр. 2-3
		%	%	%
Пальмитиновая	C 16:0	4,4	6,3	12,0
Стеариновая	C 18:0	1,9	3,1	2,2
Олеиновая	C 18:1	79,8	34,6	74,8
Линолевая	C 18:2	13,0	55,0	9,2
Линоленовая	C 18:3	-	0,2	0,5
Арахидиновая	C 20:0	0,9	0,1	0,8
Гондоиновая	C 20:1	-	-	0,2
Бегеновая	C 22:0	-	0,7	0,2

Определение жирнокислотного состава ПРМ проводилось в соответствии с действующими нормативными документами, на капиллярном газожидкостном хроматографе «Bruker – 436 GC».

Выбор подсолнечного масла высокоолеинового и линолевого типов в качестве исследовательских образцов на начальном этапе системного изучения структурно-реологических свойств ПРМ обусловлен тем, что интервал изменений содержания олеиновой кислоты в подсолнечном масле наибольший по сравнению с растительными маслами других видов [2,3].

Как видно, из приведенных в таблицах 1 и 2 данных по жирнокислотному составу ПРМ, содержание олеиновой кислоты в высокоолеиновых подсолнечных маслах почти в 3 раза

выше, чем в подсолнечных маслах линолевого типа и существенно выше содержания олеиновой кислоты в оливковом масле. Такой подход позволяет в дальнейшем с большей долей вероятности определять характер влияния олеиновой кислоты на изменение вязкости ПРМ за счет расширения интервала её концентраций в различных образцах ПРМ, учитывая при этом технологию получения различных образцов ПРМ. Кроме того, реодинамические свойства высокоолеиновых подсолнечных масел практически не исследованы, поэтому, с учётом ускоренного роста объёмов производства этого типа масел, такого рода реологические исследования весьма актуальны.

Измерения коэффициента динамической вязкости при различных значениях градиента скорости сдвига проводилось на ротационном вискозиметре «Rheotest RN 4.1». При этом численные значения коэффициента динамической вязкости  $\mu$  определялись программой прибора через 10 секунд, исходя из численных значений напряжения сдвига  $\tau$ , определённых в ходе эксперимента, при различных заданных значениях градиента скорости сдвига в интервале  $\dot{\gamma} = 1 \div 1500 \text{ с}^{-1}$ . В связи с тем, что чис-

ленные значения коэффициента динамической вязкости  $\mu$  после  $\dot{\gamma} = 600$  практически не изменялись, то для моделирования результатов реологических исследований были использованы данные, полученные при  $\dot{\gamma} = 1 \div 600 \text{ с}^{-1}$ . При этом, для анализа и моделирования данных о структурно-реологических свойствах ПРМ были рассчитаны значения отношений изменений коэффициентов динамической вязкости к изменению значений напряжения сдвига ( $\Delta\mu/\Delta\tau$ ) для каждого из образцов ПРМ.

Полученные в ходе экспериментальных исследований численные значения напряжения сдвига  $\tau$  и коэффициента динамической вязкости  $\mu$  от численных значений градиента сдвига  $\dot{\gamma}$  при температуре  $25^\circ\text{C}$  для образцов нерафинированных растительных масел представлены в таблице 3, а для образцов рафинированных растительных масел – в таблице 4.

В таблице 3 образцы ПРМ обозначены следующим образом: 1-1 – высокоолеиновое подсолнечное масло, 1-2 – подсолнечное масло линолевого типа, 1-3 – оливковое масло.

Таблица 3. Реодинамические свойства исследованных образцов нерафинированных ПРМ

№	$\dot{\gamma}, \text{с}^{-1}$	Образец 1-1			Образец 1-2			Образец 1-3		
		$\tau, \text{Па}$	$(\Delta\mu/\Delta\tau)$	$\mu \cdot 10^3, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\tau, \text{Па}$	$(\Delta\mu/\Delta\tau)$	$\mu \cdot 10^3, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\tau, \text{Па}$	$(\Delta\mu/\Delta\tau)$	$\mu \cdot 10^3, \text{Па} \cdot \text{с}$
1	1	0,09	-	120	0,2	-	110	0,18	-	130
2	2	0,19	-100	110	0,25	-100	105	0,24	-375	115
3	3	0,27	-187,5	95	0,32	-71	100	0,33	-144	102
4	4	0,32	-200	85	0,36	-197	92,1	0,38	-60	99
5	5	0,42	-100	75	0,38	-740	77,3	0,44	-200,00	87
6	10	0,68	-26,15	68,2	0,63	-61,2	62	0,73	-50,00	72,5
7	15	0,96	-13,2	64,5	0,88	-12,8	58,8	1,01	-15,86	67,6
8	20	1,3	1,17	64,9	1,17	-1,03	58,5	1,34	-0,3	67,5
9	25	1,61	0	64,9	1,46	-1,37	58,1	1,74	2,5	68,5
10	30	1,95	-0,29	64,8	1,69	-6,09	56,7	2,07	0,9	68,8
11	50	3,17	-1,15	63,4	2,77	-1,29	55,3	3,25	-3,05	65,2
12	70	4,4	-0,41	62,9	3,68	-3,07	52,5	4,46	-1,15	63,8
13	100	6,26	-0,16	62,6	5,17	-0,6	51,6	6,20	-1,03	62,0
14	200	12,26	-0,21	61,3	10,05	-0,25	50,4	12,15	-0,20	60,8
15	400	24,25	-0,06	60,6	19,75	-0,1	49,4	24,00	-0,07	60,0
16	600	36,2	-0,02	60,4	29,2	-0,08	48,6	35,94	-0,01	59,9

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ПИЩЕВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ**

На основании численных значений структурно-реологических свойств ПРМ, представленных в таблицах 3 и 4 были построены графики, иллюстрируемые рисунками 1, 2, 3 и 4.

Представленные в таблицах 3 и 4 данные показывают, что численные значения коэффициента динамической вязкости  $\mu$  для всех образцов ПРМ, кроме образца 2-1, при увеличении скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  уменьшаются, не достигая своего минимального значения даже при увеличении значений  $\dot{\gamma}$  до  $600 \text{ c}^{-1}$  и более. Для образца 2-1 значения коэффициента динамической вязкости  $\mu$  достигает своего минимального значения только при  $\dot{\gamma} = 600 \text{ c}^{-1}$ . Показатель  $(\Delta\mu/\Delta\tau)$  для образца 2-1 имеет нулевое значение, что указывает на постоянное минимальное значение  $\mu$  уже в интервале  $\dot{\gamma} = 400 \div 500 \text{ c}^{-1}$ . Для остальных образцов показатель  $(\Delta\mu/\Delta\tau)$  имеет уменьшающиеся отри-

цательные значения практически во всём интервале  $\dot{\gamma} = 0 \div 600 \text{ c}^{-1}$ . В интервале значений градиента скорости сдвига  $\dot{\gamma} = 25 \div 30 \text{ c}^{-1}$  значения  $\mu$  остаются постоянными или даже незначительно увеличиваются, что приводит к изменению знака показателя  $(\Delta\mu/\Delta\tau)$ . Изменение знака показателя  $(\Delta\mu/\Delta\tau)$  указывает на изменение структуры жидкой фазы ПРМ в интервале  $\dot{\gamma} = 15 \div 30 \text{ c}^{-1}$ , при которой происходит незначительное упрочнение этой структуры за счёт образования дополнительных межмолекулярных связей.

При экстраполяции в начало координат экспериментальных значений напряжения сдвига  $\tau$  для интервала  $\dot{\gamma} = 1 \div 5 \text{ c}^{-1}$  каждого из графиков функции  $\tau = f(\dot{\gamma})$ , представленных на рисунках 1 и 2, было установлено, что все полные реологические кривые исследованных нами ПРМ выходят практически из начала координат.

Таблица 4. Реодинамические свойства образцов рафинированных ПРМ

№	$\dot{\gamma}, \text{c}^{-1}$	Образец 2-1			Образец 2-2			Образец 2-3		
		$\tau, \text{Па}$	$(\Delta\mu/\Delta\tau)$	$\mu \cdot 10^3, \text{Па} \cdot \text{c}$	$\tau, \text{Па}$	$(\Delta\mu/\Delta\tau)$	$\mu \cdot 10^3, \text{Па} \cdot \text{c}$	$\tau, \text{Па}$	$(\Delta\mu/\Delta\tau)$	$\mu \cdot 10^3, \text{Па} \cdot \text{c}$
1	1	0,07	-	115	0,04	-	105	0,12	-	120
2	2	0,2	-76,9	105	0,18	-71,4	95	0,23	-90,9	110
3	3	0,28	-187,5	90	0,25	-142,9	85	0,32	-55,6	105
4	4	0,35	-42,9	87	0,3	-100	80	0,37	-200	95
5	5	0,39	-200	79	0,36	-166,67	70	0,43	-150,00	86
6	10	0,68	-36,2	68,5	0,58	-59,09	57	0,72	-48,28	72
7	15	1	-5,63	66,7	0,81	-13,04	54	1,02	-13,33	68
8	20	1,32	-2,81	65,8	1,06	-4	53	1,33	-4,84	66,5
9	25	1,65	0,3	65,9	1,27	-10,53	51	1,67	0	66,5
10	30	1,96	-2,25	65,2	1,66	1,28	51,5	1,97	-0,23	65,2
11	50	3,17	-1,35	63,5	2,5	-0,59	50	3,19	-0,98	64,0
12	70	4,35	-1,02	62,3	3,57	-0,93	49	4,41	-0,81	63,0
13	100	6,1	-0,74	61	4,87	-0,23	48,7	6,15	-0,86	61,5
14	200	12,01	-0,15	60,1	9,68	-0,06	48,4	12,17	-0,11	60,8
15	400	23,8	-0,05	59,5	19,33	-0,01	48,3	24,08	-0,05	60,2
16	600	35,68	0	59,5	28,9	-0,02	48,1	36,01	-0,02	60,0

Полные реологические кривые для исследованных образцов ПРМ имеют по крайней мере 2 характерных участка внутри которых коэффициенты динамической вязкости  $\mu$  изменяются незначительно друг относительно друга. Первый участок расположен в интервале значений градиента скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  от  $15 \text{ c}^{-1}$  и, примерно, до  $100 \text{ c}^{-1}$ . Второй участок

расположен в интервале значений градиента скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  примерно от  $100 \text{ c}^{-1}$  и более. При этом структура жидкой фазы ПРМ в этих интервалах отличается от структуры жидкой фазы ПРМ в интервале  $\dot{\gamma} = 1 \div 15 \text{ c}^{-1}$  на что указывает изменение знака показателя  $(\Delta\mu/\Delta\tau)$ . Это связано с наличием у данных жидкофазных ПРМ реопектических свойств.

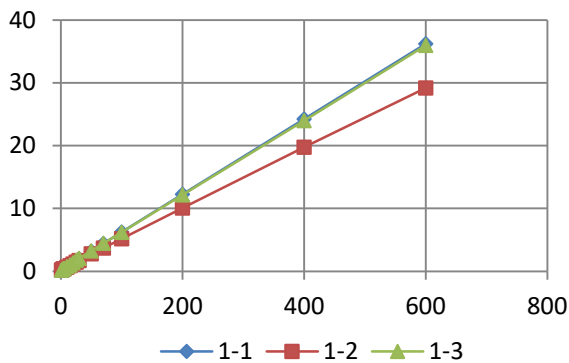


Рисунок 1 - Зависимость напряжения сдвига от градиента сдвига для нерафинированного ПРМ образцов 1-1, 1-2, 1-3

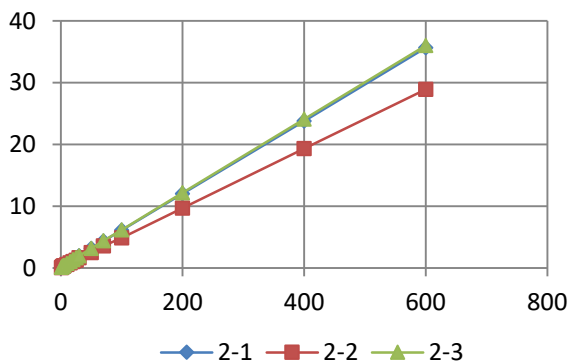


Рисунок 2 - Зависимость напряжения сдвига от градиента сдвига для рафинированных ПРМ образцов 2-1, 2-2, 2-3

Построение, по данным таблиц 3 и 4, графика зависимости коэффициента динамической вязкости от напряжения сдвига (рис. 3 и 4) для исследованных образцов растительных масел, а не от градиента сдвига, как это было проведено в [6], более наглядно показывает, что в интервале  $\dot{\gamma} = 15 \div 100 \text{ с}^{-1}$ , значения динамической вязкости изменяются относительно друг друга существенно больше по сравнению со значениями коэффициента динамической вязкости  $\mu$  в интервале  $\dot{\gamma}$  более  $100 \text{ с}^{-1}$ . Незначительное изменение численных значений  $\mu$  приведенных в таблицах 3 и 4, позволяющее говорить об относительной стабилизации коэффициента динамической вязкости, наблюдается, начиная с  $\dot{\gamma} = 100 \text{ с}^{-1}$  и более. То есть при значениях градиента скорости сдвига, приблизительно с  $\dot{\gamma} = 100 \text{ с}^{-1}$  и более, структура потока жидкой фазы практически стабилизируется и изменяется незначительно.

Таким образом, представленные, в таблицах 3 и 4, а также на рисунках 1-4, экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что исследованные нами ПРМ относятся

в соответствии с [4,5] к слабоструктурированным неньютоновским жидкофазным системам, изменения структурно-реологических свойств, которых описываются, согласно [11], моделью псевдопластичной жидкости, обладающей реопектическими свойствами.

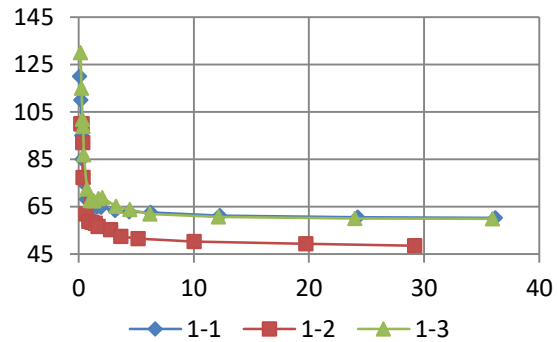


Рисунок 3 - Зависимость коэффициента динамической вязкости от напряжения сдвига для нерафинированного ПРМ образцов 1-1, 1-2, 1-3

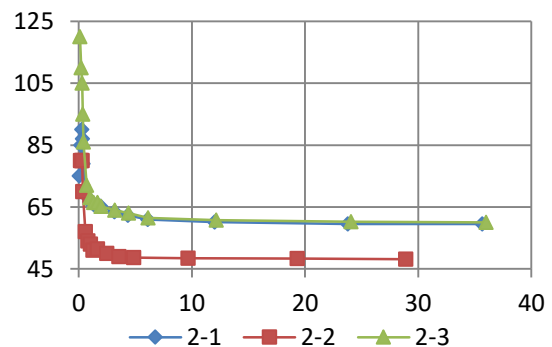


Рисунок 4 - Зависимость коэффициента динамической вязкости от напряжения сдвига для рафинированного ПРМ образцов 2-1, 2-2 и 2-3

Поскольку графики функции  $\tau = f(\dot{\gamma})$  в модели псевдопластичной жидкости выходят из начала координат, а полученные численные значения  $\mu$  в целом непрерывно уменьшаются, то эта модель допускает аппроксимацию полных реологических кривых ПРМ несколькими приблизительно прямолинейными участками с уменьшающимся наклоном этих прямых к оси  $\dot{\gamma}$ . Таким образом, модель псевдопластичной жидкости для каждого образца ПРМ допускает существование нескольких средних значений коэффициента динамической вязкости  $\mu$  в соответствующих интервалах значений градиентов скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  или напряжения сдвига  $\tau$ . В случае реализации модели бингамовской жидкости, принятой авторами работы [6], для каждого из образцов

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПИЩЕВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

растительных масел должно существовать единственное и неизменное значение коэффициента динамической вязкости  $\mu$ . Если же появляются закономерные отклонения значений коэффициента динамической вязкости, полученных из различных литературных источников, а так же экстремумы функции  $\mu = f(\tau)$ , то в парадигме модели бингамовской жидкости этот факт не поддаётся объяснению.

Модель псевдопластичной жидкости, обладающей реопектическими свойствами, позволяет адекватно интерпретировать наличие эффекта уменьшения значений коэффициента динамической вязкости, например, для подсолнечного и оливкового масел при 25°C, полученные авторами [8,9], а также аналогичных данных, представленных в таблицах 2 и 3, по сравнению с численными значениями коэффициента динамической вязкости для тех же масел, представленными в работе [6]. Поскольку численные значения коэффициента динамической вязкости ПРМ были получены авторами работы [6] при  $\dot{\gamma} = 68 \text{ с}^{-1}$ , то, согласно данным таблиц 3 и 4, а так же графикам 3 и 4 при больших значениях  $\dot{\gamma}$  коэффициент динамической вязкости как раз и должен иметь существенно меньшие значения для любого из типов ПРМ. Это происходит из-за того, что «фазовое подпространство» потока жидкой фазы каждой из ПРМ при  $\dot{\gamma} = 68 \text{ с}^{-1}$  содержит еще достаточно большое количество ассоциированных химических компонентов, по сравнению с «фазовым подпространством» жидкой фазы ПРМ, например, при  $\dot{\gamma} = 100 \text{ с}^{-1}$  и более, где первоначальные структурные элементы жидкой фазы ПРМ подвергаются практически полному разрушению.

Именно поэтому наличие двух приблизительно прямолинейных участков функции  $\tau = f(\dot{\gamma})$ , которые были получены для исследованных в нашей работе ПРМ, свидетельствует о существовании нескольких форм квазиныютовского течения жидкой фазы, что само по себе объяснимо только в парадигме модели псевдопластичной жидкости. При этом первоначальная структура неподвижной жидкой фазы деградирует непрерывно в интервале  $\dot{\gamma} = 1 \div 15 \text{ с}^{-1}$ , а после значений  $\dot{\gamma} = 15 \text{ с}^{-1}$ , формируется новая структура жидкой фазы ПРМ, образующая в интервалах градиента скорости сдвига  $\dot{\gamma} = 15 \div 100 \text{ с}^{-1}$  и  $\dot{\gamma} = 100 \div 600 \text{ с}^{-1}$  близкие по структуре квазиныютовские фазовые подпространства. Эти фазовые подпространства в случае растительных масел могут формироваться из ассоциатов, образованных как за счёт «вандервааль-

совского», так и за счёт других типов взаимодействия различных химических компонентов жидкофазной системы, исследованных ПРМ.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что существенную роль в структурообразовании жидкой фазы ПРМ играют триглицериды олеиновой кислоты.

Таким образом, модель псевдопластичной жидкости, обладающей реопектическими свойствами, позволяет не только адекватно описать полученные нами численные значения структурно-реологических свойств, исследованных образцов ПРМ, но и закономерным образом интерпретировать аналогичные литературные данные. Для более точной интерпретации особенностей полных реологических кривых модели псевдопластичной жидкости ПРМ необходимы дополнительные изучения реопектических свойств ПРМ, а также связи структурно-реологических свойств и химического состава ПРМ, которые представляют собой следующие этапы системной исследовательской программы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по методам исследования, технологическому контролю и учету производства в масложировой промышленности. Под редакцией Ржехина В.П. и Сергеева А.Г. Ленинград. 1967 г. Т.1, кн. 1.
2. Рудаков О.Б., Пономарев А.Н., Полянский К.К., Любарь А.В.. Жиры. Химический состав и экспертиза качества. Москва. «Де Ли Принт». 2005.
3. ГОСТ 30623-98. Масла растительные и маргариновая продукция. Методы обнаружения фальсификации. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск. 1998.
4. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур, М.«Наука», 1966г., -130 с.
5. Шмидт А.А., Дудина З.А., Чекмарева И.Б. Производство майонеза. Москва. «Пищевая промышленность», 1976.
6. 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, 67, (2005), p.401-405.
7. Geller D.P., Goodrum J.W. Journal of American Oil Chemist Society, 77(2), с.111-114.
8. Беззубов Л.П. Химия жиров. Москва. «Пищепромиздат», 1962.
9. Плесовский В.А. Дубовик О.А., Безденежных А.А. Физико-химия и технология производства мыла. СПб. «Химиздат», 2007.
10. О'Брайен Р. Жиры и масла. Производство. Состав и свойства. Применение. СПб.; «Профессия», 2007.
11. Валентас К., Ротштейн Э., Сингх Р.П. Пищевая инженерия: справочник с примерами расчетов. – СПб: Профессия, 2004. – 848 с.

**Волков Сергей Михайлович**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник отдела исследования жиров ВНИИЖиров, e-mail: [volkovsm@vniig.org](mailto:volkovsm@vniig.org)

**Новоселов Александр Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, кафедры процессов и аппаратов пищевых производств, факультет пищевых биотехнологий и инженерии, научно-исследовательский университет ИТМО, e-mail: [dekrosh@mail.ru](mailto:dekrosh@mail.ru)

**Федоров Александр Валентинович**, доктор технических наук, заведующий кафедрой пищевой биотехнологии продуктов из растительного сырья, факультет пище-

вых биотехнологий и инженерии, научно-исследовательский университет ИТМО, e-mail: [afedorov@corp.ifmo.ru](mailto:afedorov@corp.ifmo.ru)

**Кулишов Борис Александрович**, аспирант 2 курса, кафедры процессов и аппаратов пищевых производств, факультет пищевых биотехнологий и инженерии, научно-исследовательский университет ИТМО, e-mail: [nosfera-tu@mail.ru](mailto:nosfera-tu@mail.ru)

**Федоров Алексей Александрович**, магистрант 1 курса, кафедры процессов и аппаратов пищевых производств, факультет пищевых биотехнологий и инженерии, научно-исследовательский университет ИТМО, e-mail: [alex2829735@yandex.ru](mailto:alex2829735@yandex.ru)