

Исследование реологических свойств майонеза с нетрадиционным сырьем



С. А. Бредихин¹, А. Н. Мартеха^{1,*}, В. Н. Андреев¹,
Ю. Е. Каверина¹, И. А. Короткий²

¹ Российский государственный аграрный университет –
Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева^{ROR}, Москва, Россия

² Кемеровский государственный университет^{ROR}, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 13.05.2022
Принята после рецензирования: 02.06.2022
Принята к публикации: 05.07.2022

*А. Н. Мартеха: man6630@rgau-msha.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>
С. А. Бредихин: <https://orcid.org/0000-0002-6898-0389>
В. Н. Андреев: <https://orcid.org/0000-0002-4890-379X>
Ю. Е. Каверина: <https://orcid.org/0000-0002-8352-922X>
И. А. Короткий: <https://orcid.org/0000-0002-7623-0940>

© С. А. Бредихин, А. Н. Мартеха, В. Н. Андреев,
Ю. Е. Каверина, И. А. Короткий, 2022



Аннотация.

Реологические измерения в пищевой промышленности играют важную роль в определении физических характеристик сырья, полуфабрикатов и готовых продуктов. Цель работы состояла в исследовании влияния ингредиентов и параметров процесса гомогенизации на реологические свойства майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел, а также различных сортов мёда.

Для приготовления опытных образцов майонеза в качестве нетрадиционных ингредиентов использовали тыквенное масло холодного отжима и рафинированное рисовое масло, а также четыре сорта мёда (акациевый, липовый, лесной и весенний). Приготовление майонеза осуществляли традиционным способом на лабораторном гомогенизаторе Ultra Turrax T25 ИКА (диапазон скоростей вращения ротора 3500–24 000 об/мин). Реологические свойства мёда и опытных образцов майонеза определяли на ротационном вискозиметре Brookfield.

Сравнительный анализ реологических показателей мёда показал, что высокую вязкость имеет лесной мед, а низкую – липовый. Введение в рецептуру майонеза различных сортов мёда повлияло на реологические свойства готового продукта. Образец майонеза с лесным мёдом имел высокие значения эффективной вязкости (3,427 Па·с) и коэффициента консистенции (101,26 Па·сⁿ). Использование сухой сыворотки в качестве молочного компонента при приготовлении майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел позволило получить продукт с лучшими реологическими показателями. Также положительное влияние, по сравнению с другими углеводами, на консистенцию майонеза оказало введение инулина HD (эффективная вязкость 2,801 ± 0,001 Па·с, индекс текучести 0,2630 ± 0,0020). Используемые дисахариды обеспечивают более высокую вязкость и консистенцию майонеза, чем моносахариды. Майонез со свежим яичным желтком имел более высокую вязкость (2,656 ± 0,002 Па·с) и консистенцию (65,640 ± 0,004 Па·с) по сравнению с добавлением других яичных продуктов. Реологические характеристики майонеза также зависят от продолжительности гомогенизации и частоты вращения ротора гомогенизатора. Увеличение продолжительности гомогенизации с 2 до 4 мин при частоте вращения ротора гомогенизатора 10 000 об/мин повышало вязкость эмульсии с 6,253 до 8,736 Па·с и коэффициент консистенции – с 77,42 до 134,24 Па·сⁿ, а также снижало индекс текучести с 0,2628 до 0,1995. Частота вращения ротора гомогенизатора в диапазоне 10 000–12 000 об/мин является оптимальной для майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел и мёда.

Исследованные образцы майонеза с тыквенным и рисовым маслом, а также с мёдом относятся к неньютоновским системам, псевдопластическим типам жидкостей. Полученные эмпирические кривые течения с высокой степенью адекватности описываются моделью Гершеля-Балкли. Применение полученных результатов позволит повысить эффективность проектирования технологических процессов при производстве майонезов, улучшить качественные показатели готового продукта и снизить производственные издержки.

Ключевые слова. Майонез, реологические свойства, гомогенизация, мёд, растительное масло, углеводы

Для цитирования: Исследование реологических свойств майонеза с нетрадиционным сырьем / С. А. Бредихин [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 4. С. 739–749. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2402>

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2402>
<https://elibrary.ru/DNZOKM>

Original article
Available online at <https://fptt.ru/en>

Rheological Properties of Mayonnaise with Non-Traditional Ingredients



Sergey A. Bredikhin¹, Alexander N. Martekha^{1,*},
Vladimir N. Andreev¹, Yuliya E. Kaverina¹, Igor A. Korotkiy²

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy^{ROR}, Moscow, Russia

² Kemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, Russia

Received: 13.05.2022

Revised: 02.06.2022

Accepted: 05.07.2022

*Alexander N. Martekha: man6630@rgau-msha.ru,

<https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

Sergey A. Bredikhin: <https://orcid.org/0000-0002-6898-0389>

Vladimir N. Andreev: <https://orcid.org/0000-0002-4890-379X>

Yuliya E. Kaverina: <https://orcid.org/0000-0002-8352-922X>

Igor A. Korotkiy: <https://orcid.org/0000-0002-7623-0940>

© S.A. Bredikhin, A.N. Martekha,

V.N. Andreev, Yu.E. Kaverina, I.A. Korotkiy, 2022



Abstract.

Rheological measurements are used in the food industry to determine physical characteristics of raw materials, as well as semi-finished and finished products. We aimed to study the effects of ingredients and homogenization parameters on the rheological properties of mayonnaise prepared with pumpkin and rice oils, as well as various honeys.

Mayonnaise samples were prepared with non-traditional ingredients, namely cold-pressed pumpkin seed oil, refined rice oil, and four varieties of honey (acacia, linden, forest, and spring). The samples were made in the traditional way on an Ultra Turrax T25 IKA homogenizer (3500–24 000 rpm). The rheological properties of honey and mayonnaise were determined on a Brookfield rotational viscometer.

Forest honey had the highest viscosity, while linden honey had the lowest viscosity, compared to the other honeys. The sample of mayonnaise with forest honey had the highest effective viscosity (3.427 Pa·s) and consistency (101.26 Pa·sⁿ). The use of whey powder provided mayonnaise with the most optimal rheological parameters. Of all carbohydrates, inulin HD had the best effect on the consistency of mayonnaise, with effective viscosity of 2.801 ± 0.001 Pa·s and a flow index of 0.2630 ± 0.0020. Disaccharides provided mayonnaise with higher viscosity and consistency than monosaccharides. Mayonnaise with fresh egg yolk had higher viscosity (2.656 ± 0.002 Pa·s) and consistency (65.640 ± 0.004 Pa·s) than the samples with other egg products. The rheological characteristics of mayonnaise were also determined by the homogenization time and rotor speed. Increasing the time from 2 to 4 min at 10 000 rpm raised the emulsion's viscosity and consistency from 6.253 to 8.736 Pa·s and from 77.42 to 134.24 Pa·sⁿ, respectively, as well as reduced the flow index from 0.2628 to 0.1995. The rotor speed of 10 000–12 000 rpm was optimal for mayonnaise with pumpkin and rice oils and honey.

The studied samples of mayonnaise with pumpkin and rice oils, as well as honey, belong to non-Newtonian systems and pseudoplastic fluids. The empirical flow curves can be adequately described by the Herschel-Bulkley model. Our results can significantly increase the efficiency of mayonnaise production, improve its quality, and reduce production costs.

Keywords. Mayonnaise, rheological properties, homogenization, honey, vegetable oil, carbohydrates

For citation: Bredikhin SA, Martekha AN, Andreev VN, Kaverina YuE, Korotkiy IA. Rheological Properties of Mayonnaise with Non-Traditional Ingredients. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(4):739–749. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2402>

Введение

Пищевое сырье растительного происхождения при переработке продуктов питания подвергается различным механическим воздействиям. Производственные процессы организуются таким образом, чтобы обеспечить максимально высокий уровень качества готового продукта. Решению этой задачи

способствует изучение реологических свойств и текстуры пищевых продуктов. Реологический анализ продуктов питания позволяет определить структуру готового продукта с заданными характеристиками в соответствии с техническим регламентом на данный продукт. Определение реологических свойств пищевых продуктов становится все более важным

способом для оценки качества сырья и готового продукта, а также для прогнозирования поведения полуфабриката во время обработки [1].

Майонез представляет собой многокомпонентную, тонкодисперсную, устойчивую в широком диапазоне температур водно-жировую эмульсию прямого типа масло-в-воде, в которой растительное масло является внутренней фазой и находится в виде мельчайших капель в дисперсионной среде [2–5].

Высококалорийный майонез должен содержать свыше 50 % пищевого растительного масла, составляющего жировую фазу продукта [6]. Особенности состава и высокие органолептические свойства майонеза позволяют отнести его к перспективным продуктам питания, а также обуславливают его самостоятельное использование в качестве приправы к разнообразным блюдам. Повышая питательность и облагораживая вкус пищи, майонез способствует возбуждению аппетита и улучшает пищеварение. Майонезы считаются продуктом высокой биологической и физиологической ценности [7].

С. А. Бредихин и др. обнаружили, что пищевое растительное масло применяют в качестве основного ингредиента для создания типа водно-жировой эмульсии масло-в-воде, специфическим образом способствуя органолептическим и физико-механическим свойствам майонеза [8]. Содержание масла в майонезе оказывает влияние на реологические свойства, такие как предел текучести, модуль хранения и модуль потерь. Использование различных типов растительных масел в разном сочетании позволяет достичь желаемого состава жирных кислот и токоферолов, которые обладают функцией природных антиоксидантов и могут улучшить питательные и органолептические свойства майонеза. Производство майонеза с жировой фазой, которая состоит из смеси пищевых растительных масел, таких как подсолнечное, обогащающее продукт высоким содержанием незаменимой линолевой кислоты, и тыквенное холодного отжима с олеиновой кислотой и гамма-токоферолом (природным антиоксидантом), способствует его лучшей стойкости. Тыквенное масло холодного отжима, благодаря своему аромату и цвету, улучшает органолептические свойства майонеза.

Наряду с рафинированным дезодорированным растительным маслом главными компонентами майонезов являются молочные белки, яичный порошок, стабилизаторы и вода. В небольших количествах присутствуют жирорастворимые витамины, сахар, соль, горчица и разнообразные вкусоароматические добавки [9].

Сухое молоко, яичный порошок и растительные фосфолипиды применяют в качестве эмульгаторов [10]. Сухое молоко используют и как структурообразователь, т. к. белки молока в присутствии влаги способны набухать. Это позволяет повысить влагоудерживающую способность и

обеспечить структурирующее действие на все компоненты, входящие в майонез [11].

Горчичный порошок – вкусовая добавка. Содержащиеся в нем белки обеспечивают эмульгирование и структурообразование. Горчичный порошок должен быть сухим, обладать острым запахом аллилового масла и не темнеть. В горчичной пасте не должно ощущаться затхлости и не свойственных свежей горчице горечи и прелости [12].

Уксусная кислота улучшает вкус и повышает бактерицидные свойства майонеза. Вода необходима для растворения соли и сахара, а также для растворения и набухания белков молока и других рецептурных компонентов.

Содержащееся в майонезах растительное масло обеспечивает организм человека физиологически активными (эссенциальными) жирными кислотами, которые снижают холестерин в крови и способствуют профилактике атеросклероза; молочные компоненты и яичный порошок – источники белков и незаменимых аминокислот; сахар – источник углеводов, улучшает органолептические показатели; органические кислоты (уксусная и лимонная) – благоприятствуют пищеварению, обеспечивают требуемую кислотность и бактерицидную чистоту, отвечают за вкус и аромат [13].

Пищевая ценность майонеза определяется содержанием растительного масла, а также тем, что он представляет собой эмульсию прямого типа, легко усваиваемую организмом [14].

Эмульгирующая способность яичных желтков обусловлена наличием фосфолипидов и липопротеинов высокой и низкой плотности. В качестве ароматизаторов в майонез добавляют уксус, соль, сахар и горчицу. Все эти ингредиенты играют важную роль в физической стабильности эмульсии [15, 16]. Добавление лютеина, фикоцианина и других соединений, переработанной свеклы и фруктовых компонентов обеспечивает устойчивость к окислению, а также специфический вкус и цвет майонеза [10, 17–19]. Это повышает интерес потребителей к новым продуктам пищевой линейки. Определение реологических свойств является важным критерием качества пищевых продуктов, в том числе продуктов, представляющих собой водно-жировую эмульсию (майонез, соусы, маргарин) [20]. Знание реологических свойств этих продуктов важно для создания определенной консистенции майонеза и контроля качества в процессе получения, хранения и транспортировки [21, 22]. Реологические характеристики майонеза определяются рецептурой и составом жировой фазы, наличием загустителей, стабилизаторов и эмульгаторов [23]. Качество этих продуктов, их стабильность и вязкость зависят от процессов гомогенизации и диспергирования жи-

ровых капель в водной непрерывной фазе майонеза, яичного желтка, типа углеводов, а также доли и типа молочного компонента [24–27]. В продуктах этого типа эмульсии жировые капли механически диспергируются в непрерывной водной фазе уксусной кислоты, а действие естественного эмульгатора из яичных желтков (фосфолипидов, белков) обеспечивает большую стабилизацию всей системы [28].

Параметры процесса гомогенизации (частота вращения ротора, продолжительность) и выбор системы ротор-статор, которая образует капли жировой фазы большего или меньшего диаметра, обеспечивают различную стабильность среды и играют важную роль в образовании водно-жировой эмульсии [29–31].

Таблица 1. Рецепт для приготовления майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел

Table 1. Formulation of mayonnaise with pumpkin and rice oils

Состав	Образец	
	Доля, %	Масса, г
Масло подсолнечное рафинированное	50,0	150,0
Тыквенное масло холодного отжима	12,5	37,5
Рафинированное рисовое масло	12,5	37,5
Яичные продукты	6,2	18,6
Молочные продукты	2,1	6,3
Углеводы	2,2	6,6
Уксусная кислота	3,0	9,0
Морская соль	0,9	2,7
Горчица	0,2	0,6
Винная кислота	0,1	0,3
Дистиллированная вода	7,8	23,4
Банановое пюре	2,5	7,5
ИТОГО	100	300

Таблица 2. Рецепт приготовления майонеза с добавлением мёда

Table 2. Formulation of mayonnaise with honey

Состав	Образец	
	Доля, %	Масса, г
Масло подсолнечное рафинированное	75,0	225,0
Свежий яичный желток	7,7	23,1
Мёд	3,8	11,4
Уксусная кислота	4,0	12,0
Морская соль	0,9	2,7
Винная кислота	0,1	0,3
Дистиллированная вода	8,5	25,5
ИТОГО	100	300

Цель данного исследования заключалась в обеспечении знаний и понимания реологических и текстурных свойств майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел и различных сортов мёда, а также в получении представления о влиянии технологических параметров и состава масляной фазы на реологические свойства майонеза.

Объекты и методы исследования

Для приготовления высококалорийного майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел использовались следующие материалы: жировая фаза (масло подсолнечное рафинированное, масло тыквенное холодного отжима, масло рисовое рафинированное), яичные продукты (свежий яичный желток, яичный желток пастеризованный, цельный яичный порошок), углеводы (глюкоза, фруктоза, лактоза, сахароза, инулин HD), уксусная кислота, морская соль, горчица, молочные продукты (сухое цельное молоко, сухое обезжиренное молоко, сухая сыворотка), винная кислота, дистиллированная вода и банановое пюре (табл. 1).

Для приготовления майонеза с добавлением мёда использовались следующие материалы: жировая фаза (масло подсолнечное рафинированное), яичный желток, мёд, уксусная кислота, морская соль, винная кислота и дистиллированная вода (табл. 2).

Жировая фаза майонеза состоит из рафинированного подсолнечного масла («Слобода», Россия), тыквенного масла холодного отжима («Organic») и рафинированного рисового масла («Тауга», Тайланд). Уксус, морская соль и горчица покупались в местном магазине. Яичный желток был закуплен у частного поставщика и готовился как свежий, так и пастеризованный. Четыре вида мёда (акациевый, весенний, липовый и лесной) закуплены у частного поставщика (Московская область). Молочный компонент состоит из сухого цельного молока (белки 26,3 %, сахара 39,8 %, жиры 26 %). Сухое обезжиренное молоко (жирность 1,5 %) закуплено у компании Tagris, а сухая сыворотка (молочный жир) в количестве 2 % (белки 12–14 %, лактоза 74 %) у компании Vita-Max. Глюкоза, сахароза, фруктоза, лактоза, винная кислота и инулин HD были закуплены у компании Novaproduct. Винная кислота была добавлена в качестве регулятора кислотности майонеза. Фруктовый компонент (банановое пюре) был приготовлен путем очистки банана от кожуры, его разрезания на кусочки и измельчения через перемешивание для получения гомогенизированного образца.

Приготовление майонеза. Приготовление проб майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел производилось традиционным способом в лабораторных условиях при комнатной температуре в количестве 300 г на каждую пробу. Приготовление майонеза осуществлялось на лабораторном

гомогенизаторе модели Ultra Turrax T25 IKA с диапазоном частоты вращения ротора 3500–24 000 об/мин. Для приготовления майонеза использовалась система ротор-статор (тип S25 D-14 G-KS).

Предварительно взвешивали необходимые ингредиенты и добавляли ½ части подсолнечного масла, затем свежего яичного желтка, уксуса, воды и других ингредиентов. После включения гомогенизатора медленно добавляли оставшуюся часть подсолнечного масла, тыквенное и рисовое масла и гомогенизировали в течение 3 мин при частоте вращения ротора 10 000 об/мин. Приготовление образцов майонеза проводилось при комнатной температуре. Затем осуществляли измерение реологических свойств. Другие образцы майонеза были приготовлены таким же образом, но отдельные ингредиенты менялись в зависимости от рецептуры каждого образца и параметров процесса гомогенизации.

Реологические свойства. Измерение реологических свойств свежеприготовленных образцов майонеза с тыквенным и рисовым маслами проводили на ротационном вискозиметре Brookfield с использованием коаксиальных цилиндров. Вискозиметр подключен к компьютеру, оснащенный программным обеспечением Rheocalc 3.2, которое управляет измерением реологических свойств и выполняет обработку измеренных данных. Исследование реологических свойств образцов майонеза проводили при температурах 25 и 10 °С. Поддержание постоянной температуры образцов во время измерения на вискозиметре осуществлялось с помощью термостата модели TC-501P от Brookfield. Исследовалась зависимость напряжения сдвига (τ) и эффективной вязкости (μ) от скорости сдвига (D) в интервале скоростей 2,15–136,60 1/с (возрастающее измерение) и 136,60–2,15 1/с (обратное измерение), а также явление тиксотропности, т. е. свойство восстанавливать вязкостные и пластические свойства после снятия нагрузки и прекращения деформации.

На основании полученных экспериментальных данных был определен тип реологической модели майонеза. Установлено, что исследованные образцы обладают неньютоновскими свойствами и относятся к псевдопластическому типу жидкости. Рассчитанные значения реологических параметров – коэффициент консистенции (k) и индекс текучести (n) – были получены с помощью Microsoft Excel с использованием метода линейной регрессии.

Формула (1) описывает степенной закон Оствальда-Райнера, используемый для расчета реологических параметров:

$$\tau = k \cdot D^n \quad (1)$$

где τ – напряжение сдвига, Па; D – скорость сдвига, 1/с; k – коэффициент консистенции, Па·с ^{n} ; n – индекс текучести

Формула (2) использовалась для расчета значения эффективной вязкости образцов майонеза

$$\mu = k \cdot D^{n-1} \quad (2)$$

где μ – эффективная вязкость, Па·с.

Статистический анализ. Все испытания проводились в трехкратной повторности. Для установления значимости различий в полученных экспериментальных данных использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Управление данными и их анализ проводились с использованием программного обеспечения SPSS и представлялись как среднее значение \pm стандартное отклонение.

Результаты и их обсуждение

Реологические свойства майонеза с добавлением мёда разных сортов. Результаты исследования влияния сортов мёда и параметров процесса гомогенизации при приготовлении майонеза на изменение реологических свойств, измеренные при температуре 25 °С, показаны на рисунках 1 и 2 и в таблицах 3–6. На рисунке 1 показано соотношение напряжения сдвига и скорости сдвига для весеннего мёда, измеренное при 25 °С.

Результаты показали, что мёд принадлежит к ньютоновской жидкости, поскольку получается направление, проходящее через начало системы координат. В таблице 3 представлены реологические свойства исследуемых сортов мёда, выраженные через реологические параметры.

Результаты показали, что лесной мёд имеет высокую вязкость и коэффициент консистенции, а липовый – самую низкую вязкость.

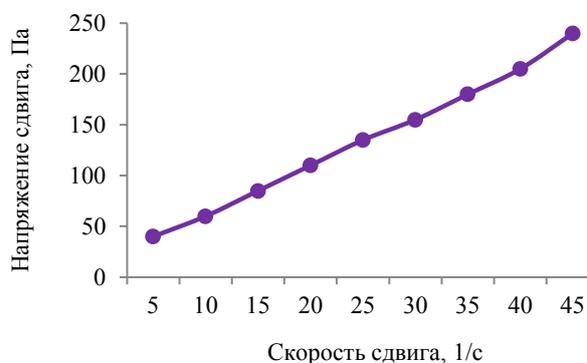


Рисунок 1. Зависимость между напряжением сдвига и скоростью сдвига весеннего мёда при 25 °С

Figure 1. Relationship between shear stress and shear rate for spring honey at 25 °С

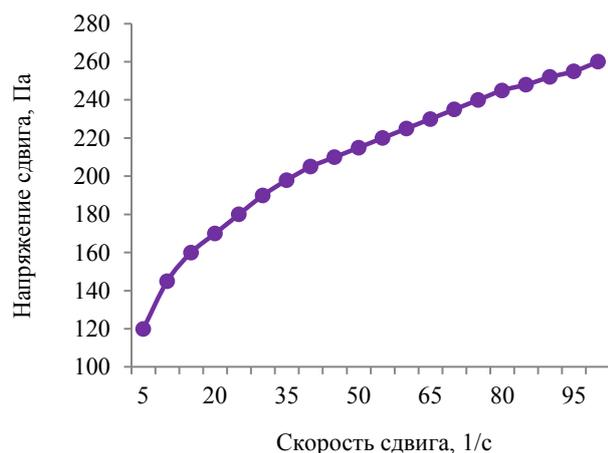


Рисунок 2. Зависимость напряжения сдвига и скорости сдвига майонеза с акациевым мёдом (10 000 об/мин, 2 мин) при 25 °С

Figure 2. Relationship between shear stress and shear rate for mayonnaise with acacia honey (10 000 rpm, 2 min) at 25 °C

Таблица 3. Реологические свойства различных сортов мёда, измеренные при 25 °С

Table 3. Rheological properties of honeys measured at 25 °C

Сорт	μ^* , Па·с	k , Па·с ⁿ	n
Весенний	4,9446	6,4789	0,8950
Лесной	16,6509	17,3020	0,9851
Липовый	4,7719	7,3144	0,8341
Акациевый	5,8413	6,0930	0,9837

*Эффективная вязкость при скорости сдвига 77,82 1/с.

*Effective viscosity at shear rate of 77.82 1/s.

Исследуемые образцы майонеза с добавлением мёда проявляют неньютоновские псевдопластические свойства. Соотношение напряжения сдвига и скорости сдвига майонеза, приготовленного с акациевым мёдом, подтверждает эту принадлежность к неньютоновским жидкостям (рис. 2).

A. Li и др. подтверждают, что майонез является неньютоновской жидкостью и демонстрирует предел текучести, псевдопластичность и тиксотропность [32]. S. Sakai и N. Ikeda указывают на псевдопластическое поведение майонеза с характеристиками, зависящими от состава сырья [10].

Эмпирические кривые течения с высокой степенью адекватности описываются моделью Гершеля-Балкли.

В таблице 4 показано влияние добавления сортов мёда на реологические параметры майонеза, приготовленного при частоте вращения ротора гомогенизатора 10 000 об/мин и времени гомогенизации 2 мин и измеренного при 25 °С.

Контрольный образец майонеза с мёдом из акации имеет эффективную вязкость $3,118 \pm 0,001$ Па·с при скорости сдвига 77,82 1/с, коэффициент консистенции $77,420 \pm 0,125$ Па·сⁿ и индекс текучести $0,2624 \pm 0,0003$, измеренный при 25 °С. При использовании липового мёда в приготовлении майонеза наблюдали повышение значения эффективной вязкости $3,294 \pm 0,002$ Па·с и коэффициента консистенции $78,460 \pm 0,002$ Па·сⁿ по сравнению с применением акациевого мёда. Лесной мёд показал более высокую вязкость и консистенцию по сравнению с другими сортами. Применение лесного мёда при приготовлении майонеза показало высокие значения эффективной вязкости $3,4270 \pm 0,0005$ Па·с и коэффициента консистенции $101,260 \pm 0,002$ Па·сⁿ, а также снижение показателя текучести $0,2224 \pm 0,0002$.

Результаты исследования влияния параметров процесса гомогенизации (частота вращения ротора, продолжительность гомогенизации) на реологические свойства майонеза с мёдом приведены в таблицах 5 и 6.

Рассчитанные значения реологического параметра показателя текучести ($n = 0-1$) показали, что исследуемый майонез относится к псевдопластическому типу. В таблице 5 показано влияние времени гомогенизации (2 и 4 мин) при частоте вращения ротора 10 000 об/мин на реологические свойства майонеза с акациевым мёдом, выраженные реологическими параметрами, измеренными при 25 °С.

Полученные результаты показывают, что при приготовлении майонеза в течение 2 мин гомогенизации дает параметры эффективной вязкости $6,253 \pm 0,001$ Па·с при скорости сдвига 30,36 1/с, коэффициенте консистенции $77,42 \pm 0,04$ Па·сⁿ и индексе текучести $0,2628 \pm 0,0002$. Путем увеличения продолжительности гомогенизации при приготовлении майонеза с 2 до 4 мин получили эмульсию с высокой вязкостью $8,7360 \pm 0,0005$ Па·с и коэффициентом консистенции $134,240 \pm 0,125$ Па·сⁿ, а также с низким индексом текучести $0,1995 \pm 0,0002$.

В таблице 6 показано влияние частоты вращения ротора гомогенизатора (10 000 и 12 000 об/мин) в течение 2 мин приготовления майонеза с акациевым мёдом на реологические параметры, измеренные при температуре 25 °С.

Результаты расчетных значений реологических параметров образцов показывают, что частота вращения ротора влияет на изменение реологических свойств майонеза. При частоте вращения ротора 10 000 об/мин эффективная вязкость получаемого майонеза была на уровне $6,253 \pm 0,001$ Па·с при скорости сдвига 30,36 1/с, коэффициенте консистенции $77,42 \pm 0,04$ Па·сⁿ и индексе текучести $0,2628 \pm 0,0002$. Дальнейшее увеличение частоты вращения ротора до 12 000 об/мин при приготовлении майонеза привело к образованию эмульсии с более

Таблица 4. Влияние сорта меда на реологические параметры майонеза

Table 4. Effect of honey variety on the rheological parameters of mayonnaise

Сорт	μ^* , Па·с	k , Па·с ⁿ	n	R^2
Весенний	3,083 ± 0,001	63,110 ± 0,029	0,3067 ± 0,0040	0,968
Лесной	3,4270 ± 0,0005	101,260 ± 0,002	0,2224 ± 0,0002	0,990
Липовый	3,294 ± 0,002	78,460 ± 0,002	0,2719 ± 0,0002	0,989
Акациевый	3,118 ± 0,002	77,420 ± 0,125	0,2624 ± 0,0003	0,994

*Эффективная вязкость при скорости сдвига 77,82 1/с. R^2 – коэффициент детерминации.

*Effective viscosity at shear rate of 77.82 1/s. R^2 is the coefficient of determination.

Таблица 5. Влияние продолжительности гомогенизации на реологические свойства майонеза с акациевым мёдом

Table 5. Effect of homogenization time on the rheological properties of mayonnaise with acacia honey

Образец, мин	μ^* , Па·с	K , Па·с ⁿ	n	R^2
2	6,253 ± 0,001	77,42 ± 0,04	0,2628 ± 0,0002	0,994
4	8,7350 ± 0,0005	134,240 ± 0,125	0,1995 ± 0,0002	0,964

*Эффективная вязкость при скорости сдвига 30,36 1/с. R^2 – коэффициент детерминации.

*Effective viscosity at shear rate of 30.36 1/s. R^2 is the coefficient of determination.

Таблица 6. Влияние частоты вращения ротора на реологические свойства майонеза с акациевым мёдом

Table 6. Effect of the rotor speed on the rheological properties of mayonnaise with acacia honey

Образец, об/мин	μ^* , Па·с	k , Па·с ⁿ	n	R^2
10 000	6,253 ± 0,010	77,42 ± 0,04	0,2628 ± 0,0002	0,994
12 000	8,039 ± 0,029	102,320 ± 0,125	0,2547 ± 0,0002	0,982

*Эффективная вязкость при скорости сдвига 30,36 1/с. R^2 – коэффициент детерминации.

*Effective viscosity at shear rate of 30.36 1/s. R^2 is the coefficient of determination.

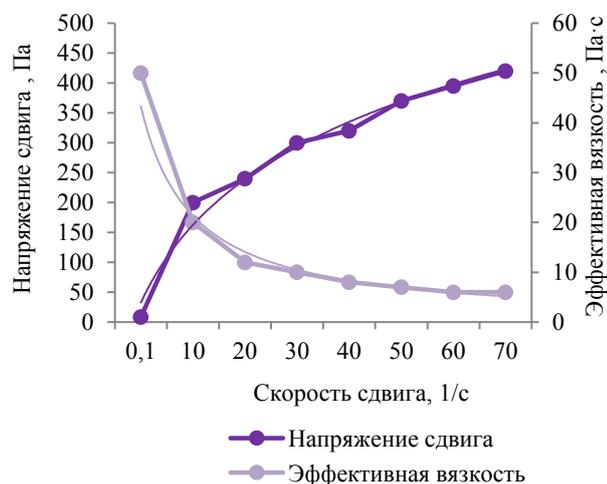


Рисунок 3. Кривые течения майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел при 25 °С

Figure 3. Flow curves for mayonnaise with pumpkin and rice oils at 25 °C

высокой эффективной вязкостью 8,039 ± 0,029 Па·с и коэффициентом консистенции 102,320 ± 0,125 Па·сⁿ. Наиболее оптимальной частотой вращения ротора

гомогенизатора является 12 000 об/мин. Водно-жировая эмульсионная система становится более стабильной, т. к. образуются более мелкие жировые капли, которые тонко диспергируются в водной фазе эмульсии.

Реологические свойства майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел. Результаты исследования влияния ингредиентов при приготовлении майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел на изменение реологических свойств, измеренные при температурах 25 и 10 °С, представлены на рисунке 3 и в таблицах 7–11.

На рисунке 3 показано соотношение напряжения сдвига и скорости сдвига для майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел при 25 °С.

Испытанные образцы майонеза проявляют не-ньютоновские псевдопластические свойства и тиксотропность. Эмпирические кривые течения с высокой степенью адекватности описываются моделью Гершеля-Балкли.

В таблице 7 показано влияние молочного компонента на реологические параметры майонеза, приготовленного в течение 3 мин при частоте вращения ротора 10 000 об/мин.

Таблица 7. Влияние молочного компонента на реологические свойства майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел

Table 7. Effect of milk component on the rheological properties of mayonnaise with pumpkin and rice oils

Образец	μ^* , Па·с	k , Па·с ⁿ	n	R^2	μ^* , Па·с	k , Па·с ⁿ	n	R^2
	25 °С				10 °С			
Сухое обезжиренное молоко	2,2290 ± 0,0002	46,870 ± 0,078	0,3005 ± 0,0030	0,998	2,7120 ± 0,0002	54,840 ± 0,029	0,3095 ± 0,0030	0,998
Сухое цельное молоко	2,3430 ± 0,0002	55,210 ± 0,004	0,2744 ± 0,0030	0,997	2,9990 ± 0,0002	67,110 ± 0,002	0,2863 ± 0,0030	0,987
Сухая сыворотка	2,3910 ± 0,0002	57,180 ± 0,003	0,2710 ± 0,0020	0,990	3,0550 ± 0,0002	69,090 ± 0,002	0,2838 ± 0,0020	0,995

*Эффективная вязкость при скорости сдвига 77,82 1/с. R^2 – коэффициент детерминации.

*Effective viscosity at shear rate of 77.82 1/s. R^2 is the coefficient of determination.

Таблица 8. Влияние углеводного состава на реологические свойства майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел

Table 8. Effect of carbohydrate composition on the rheological properties of mayonnaise with pumpkin and rice oils

Образец	μ^* , Па·с	k , Па·с ⁿ	n	R^2	μ^* , Па·с	k , Па·с ⁿ	n	R^2
	25 °С				10 °С			
Глюкоза	2,392 ± 0,004	57,160 ± 0,078	0,2712 ± 0,0010	0,990	3,052 ± 0,004	69,060 ± 0,029	0,2837 ± 0,0010	0,995
Фруктоза	1,997 ± 0,003	39,050 ± 0,003	0,3172 ± 0,0020	0,997	2,464 ± 0,003	55,620 ± 0,002	0,2842 ± 0,0020	0,989
Сахароза	2,425 ± 0,002	58,630 ± 0,004	0,2685 ± 0,0030	0,992	3,024 ± 0,002	70,150 ± 0,002	0,2780 ± 0,0030	0,995
Лактоза	2,748 ± 0,001	68,480 ± 0,002	0,2615 ± 0,0020	0,993	3,031 ± 0,001	77,510 ± 0,001	0,2556 ± 0,0020	0,984
Инулин HD	2,801 ± 0,001	69,360 ± 0,002	0,2630 ± 0,0020	0,992	3,051 ± 0,001	78,920 ± 0,004	0,2530 ± 0,0020	0,983

*Эффективная вязкость при скорости сдвига 77,82 1/с. R^2 – коэффициент детерминации.

*Effective viscosity at shear rate of 77.82 1/s. R^2 is the coefficient of determination.

Контрольный образец майонеза, приготовленный из сухой сыворотки, имел эффективную вязкость $2,3910 \pm 0,0002$ Па·с, коэффициент консистенции $57,180 \pm 0,003$ Па·сⁿ и индекс текучести $0,271 \pm 0,002$, измеренный при 25 °С. При использовании сухого обезжиренного молока была получена более низкая эффективная вязкость $2,2290 \pm 0,0002$ Па·сⁿ и коэффициент консистенции $46,870 \pm 0,078$ Па·сⁿ, а также более высокий индекс текучести $0,3005 \pm 0,0030$ по сравнению с использованием цельного молока и сухой сыворотки. Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что использование сухой сыворотки дает более высокую консистенцию и вязкость майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел по сравнению с использованием других молочных ингредиентов, измеренных при 25 °С. Кроме того, при измерении реологических свойств этих образцов при 10 °С наблюдается такое же изменение реологических параметров, что и при 25 °С. При измерении реологических свойств при

10 °С были получены более высокие значения по сравнению с измерением при 25 °С. Это подтверждает влияние температуры на реологические свойства.

В таблице 8 показано влияние типа углеводов на реологические параметры майонеза, полученного в течение 3-минутной гомогенизации при скорости вращения ротора 10 000 об/мин, измеренной при 25 и 10 °С.

Контрольный образец майонеза был приготовлен с глюкозой. Результаты исследования показывают, что использование моносахаридов глюкозы и фруктозы в приготовлении этих образцов майонеза приводит к более низким значениям эффективной вязкости и коэффициента консистенции по сравнению с использованием дисахаридов сахарозы и лактозы, инулина HD и акациевого мёда. Применение фруктозы дает наименьшую эффективную вязкость и консистенцию майонеза. Добавление инулина HD обеспечивает наивысшую консистенцию майонеза $69,360 \pm 0,002$ Па·с и эффективную вязкость

Таблица 9. Влияние яичных продуктов на реологические свойства майонеза

Table 9. Effect of egg products on the rheological properties of mayonnaise

Образец	μ^* , Па·с	k , Па·с ⁿ	n	R^2	μ^* , Па·с	k , Па·с ⁿ	n	R^2
	25 °С				10 °С			
Свежий яичный желток	2,656 ± 0,002	65,640 ± 0,004	0,2634 ± 0,0020	0,991	3,144 ± 0,001	73,520 ± 0,004	0,2761 ± 0,0020	0,998
Яичный желток пастеризованный	2,391 ± 0,002	57,150 ± 0,003	0,2711 ± 0,0002	0,990	3,054 ± 0,002	69,090 ± 0,003	0,2838 ± 0,0030	0,995
Цельный яичный порошок	2,504 ± 0,001	54,230 ± 0,002	0,2937 ± 0,0030	0,999	3,116 ± 0,002	71,240 ± 0,002	0,2813 ± 0,0020	0,997

*Эффективная вязкость при скорости сдвига 77,82 1/с. R^2 – коэффициент детерминации.

*Effective viscosity at shear rate of 77.82 1/s. R^2 is the coefficient of determination.

Таблица 10. Влияние продолжительности гомогенизации на реологические свойства майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел

Table 10. Effect of homogenization time on the rheological properties of mayonnaise with pumpkin and rice oils

Образец, мин	μ^* , Па·с	k , Па·с ⁿ	n	R^2	μ^* , Па·с	k , Па·с ⁿ	n	R^2
	25 °С				10 °С			
1	1,548 ± 0,002	42,150 ± 0,004	0,2887 ± 0,0020	0,991	2,244 ± 0,001	60,410 ± 0,004	0,2908 ± 0,0020	0,998
3	1,939 ± 0,002	57,150 ± 0,003	0,2711 ± 0,0020	0,990	2,485 ± 0,002	69,099 ± 0,003	0,2838 ± 0,0030	0,995
5	1,758 ± 0,001	53,610 ± 0,002	0,3282 ± 0,0030	0,999	2,208 ± 0,002	58,760 ± 0,002	0,3026 ± 0,0020	0,997

*Эффективная вязкость при скорости сдвига 103,8 1/с. R^2 – коэффициент детерминации.

*Effective viscosity at shear rate of 103.8 1/s. R^2 is the coefficient of determination.

2,801 ± 0,001 Па·с, а также самый низкий индекс текучести 0,2630 ± 0,0020, измеренный при 25 °С. S. Alvarez-Sabatel и др. обнаружили, что содержание растительного масла и инулина влияет на стабильность и реологические свойства майонеза, полученного путем гомогенизации в системе ротор-статор, а также гомогенизации под высоким давлением [17]. При измерении реологических свойств этих образцов майонеза с тыквенным и рисовым маслами при 10 °С наблюдали такое же влияние ингредиентов на реологические параметры.

Результаты исследования влияния яичных продуктов на реологические параметры майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел, приготовленного за 3 мин гомогенизации и скорости ротора 10 000 об/мин и измеренного при 25 и 10 °С, представлены в таблице 9.

Приготовление майонеза со свежим яичным желтком дает высокое значение вязкости 2,656 ± 0,002 Па·с и коэффициента консистенции 65,640 ± 0,004 Па·сⁿ, а также низкий индекс текучести 0,2634 ± 0,0020. При использовании цельного яичного порошка было получено более высокое значение эффективной вязкости и консистенции, по сравнению с применением пастеризованного желтка, и более низкое значение этих параметров по

сравнению с применением свежего яичного желтка. Аналогичные результаты наблюдались при измерении реологических свойств майонеза при 10 °С, но они были выше, чем при 25 °С.

Результаты исследования влияния параметров процесса гомогенизации (частота вращения ротора, продолжительность гомогенизации) на реологические свойства майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел представлены в таблицах 10 и 11. Расчетные значения реологического параметра индекса текучести показывают, что исследованный майонез относится к неньютоновским жидкостям псевдопластического типа.

В таблице 10 показано влияние продолжительности гомогенизации (1, 3 и 5 мин) при частоте вращения ротора 10 000 об/мин на реологические свойства майонеза при 25 и 10 °С.

Полученные результаты показывают, что в течение 1 мин гомогенизации значение эффективной вязкости 1,548 ± 0,002 Па·с было получено при скорости сдвига 103,8 1/с, коэффициенте консистенции 42,150 ± 0,004 Па·сⁿ и показателе текучести 0,2887 ± 0,0020. Путем увеличения продолжительности гомогенизации при приготовлении майонеза с 1 до 3 мин получили эмульсию с высокой

Таблица 11. Влияние частоты вращения ротора на реологические свойства майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел

Table 11. Effect of the rotor speed on the rheological properties of mayonnaise with pumpkin and rice oils

Образец, об/мин	25 °С				10 °С			
	μ^* , Па·с	k , Па·с ⁿ	n	R^2	μ^* , Па·с	k , Па·с ⁿ	n	R^2
10 000	1,939 ± 0,002	57,150 ± 0,004	0,2711 ± 0,0020	0,990	2,485 ± 0,001	69,090 ± 0,004	0,2838 ± 0,0020	0,995
12 000	2,281 ± 0,002	59,880 ± 0,003	0,2242 ± 0,0020	0,999	2,515 ± 0,002	75,130 ± 0,003	0,3075 ± 0,0030	0,996
15 000	1,810 ± 0,001	38,910 ± 0,002	0,3375 ± 0,0030	0,996	2,208 ± 0,002	49,560 ± 0,002	0,3299 ± 0,0020	0,995

*Эффективная вязкость при скорости сдвига 77,82 1/с. R^2 – коэффициент детерминации.

*Effective viscosity at shear rate of 77.82 1/s. R^2 is the coefficient of determination.

вязкостью $1,936 \pm 0,002$ Па·с и консистенцией $57,150 \pm 0,003$ Па·сⁿ, а также низким индексом текучести $0,2711 \pm 0,0020$. Дальнейшее увеличение времени приготовления майонеза до 5 мин повлекло за собой разрушение структуры. Это привело к снижению вязкости до $1,758 \pm 0,001$ Па·с и коэффициента консистенции до $53,610 \pm 0,002$ Па·сⁿ, а также к увеличению индекса текучести до $0,3282 \pm 0,0030$. При измерении реологических свойств майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел при 10 °С наблюдались такие же результаты, но они были выше, чем при 25 °С. В таблице 11 показано влияние частоты вращения ротора гомогенизатора (10 000, 12 000 и 15 000 об/мин) на реологические параметры майонеза, измеренные при температурах 25 и 10 °С в течение 3-х мин приготовления.

Результаты расчетных значений реологических параметров образцов показывают, что частота вращения ротора влияет на изменение реологических свойств. Увеличение частоты вращения ротора с 10 000 до 12 000 об/мин повышает значение эффективной вязкости майонеза до $2,281 \pm 0,002$ Па·с и коэффициента консистенции до $59,880 \pm 0,003$ Па·с, а также снижает индекс текучести до $0,2242 \pm 0,0020$. Это означает, что система становится более стабильной, поскольку образует большое количество мелких жировых капель, которые тонко диспергированы в водной фазе эмульсии. Дальнейшее увеличение частоты вращения ротора до 15 000 об/мин привело к образованию эмульсии с более низкой эффективной вязкостью $1,810 \pm 0,001$ Па·с и коэффициентом консистенции $38,910 \pm 0,002$ Па·сⁿ по сравнению с частотой вращения ротора 10 000 и 12 000 об/мин. Это явление можно объяснить увеличением вязкости и консистенции майонеза за счет повышения частоты вращения ротора гомогенизатора до определенного значения. Однако при дальнейшем увеличении частоты вращения ротора устойчивая структура водно-жировой эмульсии нарушается, т. е. система «разбавляется». Это явление можно увидеть, измерив реологические свойства майонеза при 10 °С.

Выводы

Испытанные образцы майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел и различных сортов мёда можно отнести к неньютоновским системам псевдопластического типа жидкости. При применении молочного компонента сухой сыворотки при приготовлении майонеза были получены реологические свойства с высокой эффективной вязкостью и коэффициентом консистенции, а также низким индексом текучести. Показано влияние типа углеводов на реологические свойства майонеза с добавлением тыквенного и рисового масел. Майонез, приготовленный с инулином HD, имеет более высокую эффективную вязкость $2,801 \pm 0,001$ Па·с и консистенцию, а также более низкий индекс текучести $0,2630 \pm 0,0020$ по сравнению с использованием других примененных сахаров. Используемые дисахариды обеспечивают более высокую вязкость и консистенцию майонеза по сравнению с моносахаридами. Майонез со свежим яичным желтком имеет высокую вязкость $2,656 \pm 0,002$ Па·с и консистенцию $65,640 \pm 0,004$ Па·сⁿ. При использовании лесного мёда в приготовлении майонеза были получены реологические свойства с более высокой эффективной вязкостью и коэффициентом консистенции, а также более низким индексом текучести по сравнению с применением весеннего, липового и акациевого мёда. Майонез из весеннего мёда имеет самую низкую эффективную вязкость и консистенцию, а также самый высокий индекс текучести.

Частота вращения ротора гомогенизатора, а также продолжительность гомогенизации при постоянной частоте вращения также оказывают влияние на изменение реологических свойств майонеза. При частоте вращения ротора 12 000 об/мин был получен майонез с более высокой вязкостью и консистенцией, а также с более низким индексом текучести по сравнению с частотой вращения 10 000 об/мин. Высокая вязкость и консистенция, а также низкий индекс текучести были получены при продолжительности гомогенизации в течение 3-х мин. Эмпирические кривые течения с высокой

степенью адекватности описываются моделью Гершеля-Балкли.

Результаты, представленные в данной работе, могут быть полезны разработчикам пищевых жировых продуктов, особенно при производстве майонеза. Знание реологических свойств важно для разработки определенной консистенции майонеза и контроля качества при производстве, хранении и транспортировке.

Критерии авторства

С. А. Бредихин руководил работой. Все авторы принимали участие в исследованиях, обработке данных и написании текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

S.A. Bredikhin supervised the research. All the authors performed the experiments, processed the data, and wrote the manuscript.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

References/Список литературы

1. Yildirim M, Sumnu G, Sahin S. Rheology, particle-size distribution, and stability of low-fat mayonnaise produced via double emulsions. *Food Science and Biotechnology*. 2016;25(6):1613–1618. <https://doi.org/10.1007/s10068-016-0248-7>
2. Ghorbani Gorji S, Smyth HE, Sharma M, Fitzgerald M. Lipid oxidation in mayonnaise and the role of natural antioxidants: A review. *Trends in Food Science and Technology*. 2016;56:88–102. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.08.002>
3. Mohammed NK, Ragavan H, Ahmad NH, Hussin ASM. Egg-free low-fat mayonnaise from virgin coconut oil. *Foods and Raw Materials*. 2022;10(1):76–85. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-1-76-85>
4. Averyanova EV, Shkolnikova MN, Chugunova OV. Antioxidant Properties of Triterpenoids in Fat-Containing Products. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(2):233–243. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2358>
5. Katsaros G, Tsoukala M, Giannoglou M, Taoukis P. Effect of storage on the rheological and viscoelastic properties of mayonnaise emulsions of different oil droplet size. *Heliyon*. 2020;6(12) <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05788>
6. Miguel GA, Jacobsen C, Prieto C, Kempen PJ, Lagaron JM, Chronakis IS, *et al.* Oxidative stability and physical properties of mayonnaise fortified with zein electrosprayed capsules loaded with fish oil. *Journal of Food Engineering*. 2019;263:348–358. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.07.019>
7. Taslikh M, Mollakhalili-Meybodi N, Alizadeh AM, Mousavi M-M, Nayebzadeh K, Mortazavian AM. Mayonnaise main ingredients influence on its structure as an emulsion. *Journal of Food Science and Technology*. 2021;59(6):2108–2116. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05133-1>
8. Bredikhin SA, Martekha AN, Andreev VN, Soldusova EA, Karpova NA. Investigation of the structural and mechanical characteristics of mayonnaise with the addition of linseed oil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;979(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012089>
9. Armaforte E, Hopper L, Stevenson G. Preliminary investigation on the effect of proteins of different leguminous species (*Cicer arietinum*, *Vicia faba* and *Lens culinaris*) on the texture and sensory properties of egg-free mayonnaise. *LWT*. 2021;136. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110341>
10. Sakai S, Ikeda N. A numerical analysis to evaluate the emulsifying activity of pasteurized egg yolk. *Food Hydrocolloids*. 2022;123. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107087>
11. Chen J, Cao C, Yuan D, Xia X, Liu Q, Kong B. Impact of different ionic strengths on protein-lipid co-oxidation in whey protein isolate-stabilized oil-in-water emulsions. *Food Chemistry*. 2022;385. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132700>
12. Jalali-Jivan M, Abbasi S. Novel approach for lutein extraction: Food grade microemulsion containing soy lecithin & sunflower oil. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2020;66. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102505>
13. Patil U, Benjakul S. Physical and textural properties of mayonnaise prepared using virgin coconut oil/fish oil blend. *Food Biophysics*. 2019;14(3):260–268. <https://doi.org/10.1007/s11483-019-09579-x>
14. Primacella M, Wang T, Acevedo NC. Characterization of mayonnaise properties prepared using frozen-thawed egg yolk treated with hydrolyzed egg yolk proteins as anti-gelator. *Food Hydrocolloids*. 2019;96:529–536. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.06.008>
15. Park J-Y, Choi M-J, Yu H, Choi Y, Park K-M, Chang P-S. Multi-functional behavior of food emulsifier erythorbyl laurate in different colloidal conditions of homogeneous oil-in-water emulsion system. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022;636. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.128127>
16. Feng T, Fan C, Wang X, Wang X, Xia S, Huang Q. Food-grade Pickering emulsions and high internal phase Pickering emulsions encapsulating cinnamaldehyde based on pea protein-pectin-EGCG complexes for extrusion 3D printing. *Food Hydrocolloids*. 2022;124. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107265>

17. Alvarez-Sabatel S, Martínez de Marañón I, Arboleya J-C. Impact of oil and inulin content on the stability and rheological properties of mayonnaise-like emulsions processed by rotor-stator homogenization or high pressure homogenization (HPH). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2018;48:195–203. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.06.014>
18. Raikov V, McDonagh A, Ranawana V, Duthie G. Processed beetroot (*Beta vulgaris* L.) as a natural antioxidant in mayonnaise: Effects on physical stability, texture and sensory attributes. *Food Science and Human Wellness*. 2016;5(4):191–198. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2016.10.002>
19. Ovsyannikov VYu, Toroptsev VV, Berestovoy AA, Lobacheva NN, Lobacheva MA, Martekha AN. Development and research of new method for juice extracting from sugar beet with preliminary pressing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;640(5). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/5/052011>
20. Bonilla JC, Clausen MP. Super-resolution microscopy to visualize and quantify protein microstructural organization in food materials and its relation to rheology: Egg white proteins. *Food Hydrocolloids*. 2022;124. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107281>
21. van Eck A, Fogliano V, Galindo-Cuspinera V, Scholten E, Stieger M. Adding condiments to foods: How does static and dynamic sensory perception change when bread and carrots are consumed with mayonnaise? *Food Quality and Preference*. 2019;73:154–170. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.11.013>
22. Heydari A, Razavi SMA, Farahnaky A. Effect of high pressure-treated wheat starch as a fat replacer on the physical and rheological properties of reduced-fat O/W emulsions. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2021;70. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102702>
23. Kantekin-Erdogan MN, Ketenoglu O, Tekin A. Effect of monoglyceride content on emulsion stability and rheology of mayonnaise. *Journal of Food Science and Technology*. 2019;56(1):443–450. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3506-2>
24. Aganovic K, Bindrich U, Heinz V. Ultra-high pressure homogenisation process for production of reduced fat mayonnaise with similar rheological characteristics as its full fat counterpart. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2018;45:208–214. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.10.013>
25. Yang X, Li A, Yu W, Li X, Sun L, Xue J, *et al.* Structuring oil-in-water emulsion by forming egg yolk/alginate complexes: Their potential application in fabricating low-fat mayonnaise-like emulsion gels and redispersible solid emulsions. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020;147:595–606. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.106>
26. Shen R, Luo S, Dong J. Application of oat dextrine for fat substitute in mayonnaise. *Food Chemistry*. 2011;126(1):65–71. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.10.072>
27. Seo CW, Yoo B. Preparation of milk protein isolate/ κ -carrageenan conjugates by maillard reaction in wet-heating system and their application to stabilization of oil-in-water emulsions. *LWT*. 2021;139. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110542>
28. Gmach O, Bertsch A, Bilke-Krause C, Kulozik U. Impact of oil type and pH value on oil-in-water emulsions stabilized by egg yolk granules. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019;581. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123788>
29. Kumar Y, Roy S, Devra A, Dhiman A, Prabhakar PK. Ultrasonication of mayonnaise formulated with xanthan and guar gums: Rheological modeling, effects on optical properties and emulsion stability. *LWT*. 2021;149. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111632>
30. Bredikhin SA, Andreev VN, Martekha AN, Soldusova EA. Investigation of the process of structure formation during ultrasonic homogenization of milk. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;954(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/954/1/012014>
31. Bredihin SA, Andreev VN, Martekha AN, Schenzle MG, Korotkiy IA. Erosion potential of ultrasonic food processing. *Foods and Raw Materials*. 2021;9(2):335–344. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-335-344>
32. Li A, Gong T, Hou Y, Yang X, Guo Y. Alginate-stabilized thixotropic emulsion gels and their applications in fabrication of low-fat mayonnaise alternatives. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020;146:821–831. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.050>