ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-915-929

Оригинальная статья
http://fptt.ru

Изучение физико-химических показателей эмульгаторов и их влияния на процесс образования пищевых эмульсий

Л. В. Терещук[1], К. А. Загородников[2], К. В. Старовойтова[1,*], П. А. Вьюшинский[3]

[1] *Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия*

[2] *Московский государственный университет пищевых производств, Москва, Россия*

[3] *ООО «Зеленые линии», Красногорск, Россия*

Поступила в редакцию: 06.08.2021

Принята после рецензирования: 01.11.2021
Принята в печать: 01.12.2021

**e-mail: centol@mail.ru*
© Л. В. Терещук, К. А. Загородников, К. В. Старовойтова, П. А. Вьюшинский, 2021

Аннотация.
Введение. Исследование свойств эмульгаторов и их влияния на характеристики пищевых эмульсий, разработка технологических решений по подбору эмульгаторов и их смесей для различных продуктов является актуальным направлением научных исследований. Цель работы – исследование влияния физико-химических показателей поверхностно-активных веществ на свойства пищевых эмульсий, а также разработка практических рекомендаций по их подбору для создания эмульсионных продуктов различных типов.
Объекты и методы исследования. Модельные молочно-жировые эмульсии; спреды, изготовленные в лаборатории; твердые и мягкие моноглицериды жирных кислот и лецитины различных производителей. Температуру плавления эмульгаторов определяли методом, который основан на фиксации температуры поднятия расплава эмульгатора в капилляре, открытом с двух концов. Жирнокислотный состав определяли путем получения хроматограмм метиловых эфиров жирных кислот с последующей идентификацией разделяемых компонентов и их количественным определением по площади пиков. Содержание твердых триглицеридов в эмульгаторах определяли методом ЯМР. Сведения о гидрофильно-липофильном балансе исследуемых эмульгаторов были получены из спецификаций производителей.
Результаты и их обсуждение. Установлено, что твердые моноглицериды отличаются повышенным содержанием стеариновой и пальмитиновой кислот. В мягких моноглицеридах преобладает олеиновая кислота, в комплексном эмульгаторе «моноглицериды/лецитин» – линоленовая и олеиновая жирные кислоты. Твердые моноглицериды характеризуются высоким содержанием твердых триглицеридов при 35 °С (82,93 %), что коррелирует с высокой температурой плавления (80 °С) и низким йодным числом (3 мг I_2/100 г). Для формирования рекомендаций по способу подготовки эмульгатора к внесению в состав пищевой эмульсии были подобраны соотношения рафинированного дезодорированного жидкого растительного масла и эмульгатора. Эмульгаторы растворяли в масле при температуре на 5–7 °С выше температуры плавления эмульгатора при соотношении масло:эмульгатор от 6:1 до 10:1. При изучении процесса переохлаждения эмульсии при производстве спредов с использованием различных эмульгаторов определена температура кристаллизации и время фазового перехода.
Выводы. Данные, полученные в результате исследования, позволяют расширить теоретические основы создания пищевых эмульсий путем разработки научно обоснованных рекомендаций по подбору поверхностно-активных веществ и открывают перспективы дальнейших исследований свойств различных эмульгаторов и их влияния на качество готовых пищевых эмульсий.

Ключевые слова. Эмульгаторы, гидрофильно-липофильный баланс, поверхностно-активные свойства, коагуляционные структуры, кристаллизационные структуры, жирно-кислотный состав

Финансирование. Соглашение между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России) и ООО «Зеленые линии» о предоставлении из федерального бюджета субсидии на реализацию комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием Московского государственного университета пищевых производств (МГУПП) от 26 ноября 2019, № 075-11-2019-042

Для цитирования: Изучение физико-химических показателей эмульгаторов и их влияния на процесс образования пищевых эмульсий / Л. В. Терещук [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 915–929. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-915-929.

Original article

Available online at http://fptt.ru/eng

Physical and Chemical Parameters of Emulsifiers and Their Effect on the Process of Food Emulsion Formation

Lubov V. Tereshchuk[1], Konstantin A. Zagorodnikov[2], Kseniya V. Starovoitova[1,*], Pavel A. Viushinskij[3]

[1] *Kemerovo State University, Kemerovo, Russia*

[2] *Moscow State University of Food Production, Moscow, Russia*

[3] *LLC Zelenye linii, Krasnogorsk, Russia*

Received: August 06, 2021

Accepted in revised form: November 01, 2021
Accepted for publication: December 01, 2021

**e-mail: centol@mail.ru*
© L.V. Tereshchuk, K.A. Zagorodnikov, K.V. Starovoitova, P.A. Viushinskij, 2021

Abstract.
Introduction. Modern food science needs new research of food emulsifiers, their composition, properties and effect on the structural characteristics of emulsions. It looks for modern technological solutions on how to select proper emulsifiers and their mixes to produce emulsions with different mass fractions of fat. The research objective was to study the effect of physical and chemical indicators of surfactants on the properties of food emulsions, as well as to develop practical recommendations for the selection of surfactants for various types of products.
Study objects and methods. The research featured model dairy fat emulsions and laboratory-made vegetable oil, as well as hard and soft mono- and diglycerides of fatty acids and lecithins. The emulsifiers were used to determine the melting point, fatty acid composition, iodine number, and solid triglyceride content at various temperatures. The melting point of emulsifiers was determined by fixing the melting temperature in a capillary oven. To identify the fatty acid composition, the methyl esters of fatty acids were subjected to the chromatogram method. After that, the separated components and their quantity were determined by the area of the peaks. The content of solid triglycerides in the emulsifiers was determined by the method of nuclear magnetic resonance. The hydrophilic-lipophilic balance was obtained from the manufacturer's specifications.
Results and discussion. The solid mono- and diglycerides appeared to have a high content of stearic and palmitic acids. Oleic acid predominated in soft monoglycerides; unsaturated fatty acids (linolenic and oleic) also predominated in the monoglycerides/lecithin complex emulsifier. Solid monoglycerides had a high content of solid triglycerides at 35°C (82.93%), which correlated with the high melting point (80°C) and the lowest iodine number (3 mg I_2/100 g) of all the samples. The optimal ratio of vegetable oil and the emulsifier was defined empirically. The emulsifiers were dissolved in refined deodorized vegetable oil at 5–7°C above the melting point of the emulsifier. The resulting ratios were between 6:1 and 10:1. The samples of creamy vegetable spreads were obtained using the studied emulsifiers and their compositions in different doses and ratios. The crystallization temperature and phase transition time were determined when studying the process of emulsion overcooling. The article introduces a list of technological and physicochemical indicators of emulsifiers: the fatty acid composition, the degree of saturation, the melting point, and the content of solid triglycerides. By finding out the physicochemical parameters of emulsifiers, producers can vary the ratio of the components of emulsifying compositions to achieve the desired properties of food emulsions. The hydrophilic-lipophilic balance also proved to be an important index since the proportion of hydrophilic and hydrophobic groups in surfactants affects the type of emulsions and makes it possible to adjust the fat content of the finished product.
Conclusion. The research results can expand the theoretical foundations of food emulsions. The article contains scientifically grounded recommendations on how to select optimal surfactants. The research opens up prospects for further studies of emulsifiers and their effect on the quality of finished products.

Keywords. Emulsifiers, hydrophilic-lipophilic balance, surface-active properties, coagulation structures, crystallization structures, fatty acid composition

Funding. The present research was performed by LLC Zelenye Linii and the Moscow State University of Food Production (MSUFP) as part of assignment No. 075-11-2019-042 from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauka) (November 26, 2019).

For citation: Tereshchuk LV, Zagorodnikov KA, Starovoitova KV, Viushinskij PA. Physical and Chemical Parameters of Emulsifiers and Their Effect on the Process of Food Emulsion Formation. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):915–929. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-915-929.

Введение

Существенную долю в современной структуре питания занимают эмульсионные пищевые продукты. Водно-жировые системы, стабилизированные природными и синтезированными поверхностно-активными веществами, обладают лучшей усваиваемостью организмом человека, чем нативные масла и жиры. Изменение в определенном диапазоне доли водной и жировой фазы, концентрации и соотношений поверхностно-активных веществ позволяет создавать продукты с необходимым составом и свойствами. Стабильность эмульсионных продуктов зависит от различных факторов: вида и химической структуры эмульгатора, способа производства пищевых эмульсий, степени модификации и очистки составляющих липидной фазы эмульсии [1, 2].

Выбор эмульгаторов для создания эмульсионных продуктов обусловлен многими факторами, характеризующими как ожидаемые свойства конечного продукта, так и особенности технологического процесса его изготовления. Большое значение имеют тип и свойства эмульсионной системы, возможное взаимодействие эмульгатора с другими рецептурными ингредиентами, а также его влияние на органолептические свойства продукта, в том числе вкус, аромат и сенсорные ощущения во рту при употреблении продукта в пищу. Технологические параметры перемешивания, гомогенизации, взбивания, перекачивания и др. влияют на выбор эмульгатора [3].

Поверхностно-активные вещества являются незаменимым компонентом в производстве пищевых эмульсий. Использование эмульгаторов в рецептурах спредов, маргаринов и майонезной продукции улучшает дисперсность и стойкость готового продукта, способствует легкому усвоению масел и жиров, входящих в состав продукта, организмом человека. Таким образом, эмульгаторы проявляют не только технологические, но и функциональные свойства. Изучение состава эмульгаторов с целью установления критериев их действия является необходимым и важным этапом в производстве продуктов питания.

Важнейшим показателем качества эмульсионных продуктов является их стойкость при термическом и механическом воздействии. Она зависит от различных факторов: соотношения гидрофильных и липофильных групп в химической структуре эмульгатора; состава и концентрации твердых и жидких фаз в триацилглицеринах как создаваемых эмульсий, так и используемого эмульгатора; технологических условий кристаллизации пищевых эмульсий [4–7]. Основными показателями липидной фазы эмульсионных масложировых продуктов, включающей природные масла и их смеси с модифицированными жировыми компонентами, а также с эмульгаторами, является пластичность, хорошая намазываемость и легкоплавкость. Эти показатели зависят от правильно подобранного комплекса поверхностно-активных веществ, компонентного состава используемых эмульгаторов, их свойств и дозировки. При составлении рецептуры липидной фазы пищевых эмульсий, которые могут быть низко- и высокожирными, в общем количестве жиров учитывают жир, введенный с эмульгатором. В связи с этим важным является контроль показателей безопасности вводимых эмульгаторов, в том числе содержание транс-изомеров жирных кислот [8, 9].

Следующей важной функцией эмульгаторов является управление процессом кристаллизации жиров [10–12]. Эмульгаторы, участвуя в формировании структуры пищевых эмульсии, определяют размер кристаллов дисперсной фазы и скорость их роста. От состава и свойств эмульгатора зависит формирование структуры и консистенции продукта, его термоустойчивость. Именно технологические свойства правильно подобранного эмульгатора определяют однородную и пластичную консистенцию при замораживании и оттаивании продукта и оказывают влияние на длительность хранения, способствуя предотвращению выделения капель влаги или масла [13–15].

Наблюдается повышенный спрос не только на моно- и диглицериды жирных кислот, но и на их смеси с фосфолипидами и их синтетическими аналогами [16–18]. Из всех групп фосфолипидов наивысшей поверхностной активностью обладает фосфатидилхолин (лецитин), в меньшей – фосфатидилсерин, фосфатидилинозитол и фосфатидные кислоты. Разработаны комплексные эмульгаторы (моноглицериды/лецитин) с использованием различных видов моноглицеридов (твердых и мягких) и лецитинов (фракционированных, гидролизованных, ацетилированных), обладающие эмулирующим и антиоксидантным действием для различных типов эмульсий в широком диапазоне жирности. При смешивании эмульгаторов проявляется синергетический эффект усиления свойств отдельных поверхностно-активных веществ, входящих в комплекс [19–21].

Таким образом, изучение состава и свойств эмульгаторов, их влияния на структурные характеристики пищевых эмульсий, а также разработка технологических решений по подбору эмульгаторов и их смесей для пищевых эмульсии с различной массовой долей жира является актуальным направлением научных исследований [19–21].

Одним из условий производства качественных эмульсионных продуктов является проведение фундаментальных и прикладных исследований состава и свойств сырьевых компонентов пищевых эмульсий. Совокупность технологических и функциональных свойств правильно подобранных пищевых добавок и их комплексов обуславливает назначение конечного продукта и обеспечивает его качество [22–25].

Целью работы является исследование влияния физико-химических показателей различных поверхностно-активных веществ на свойства пищевых эмульсий, а также разработка практических рекомендаций по их подбору для создания эмульсионных продуктов различных типов.

Объекты и методы исследования

Для достижения поставленной цели были смоделированы и изготовлены в лабораторных условиях пищевые эмульсии с варьируемым соотношением липидной и водной фаз, а также с использованием нескольких поверхностно-активных веществ (ПАВ).

В качестве объектов исследования выступали модельные молочно-жировые эмульсии и сливочно-растительные спреды, изготовленные в лабораторных условиях. Также были исследованы физико-химические свойства используемых поверхностно-активных веществ: твердых и мягких моно- и диглицеридов жирных кислот и лецитинов.

В работе были использованы моноглицериды дистиллированные марки 2 (Е471), выработанные на основе пальмового стеарина, и моноглицериды марки ПО-90. Они представляют собой дистиллированные моноглицериды на основе рапсового масла (ГК «НМЖК, г. Нижний Новгород). Лецитин (Е322), использованный в работе, произведен компанией ООО «Ювикс-фарм».

Выбор в качестве объектов исследований моно- и диглицеридов жирных кислот и лецитинов, полученных разными способами, обусловлен тем, что именно эти виды эмульгаторов зарекомендовали себя как эффективные в производстве молочно-жировых эмульсионных продуктов, в том числе спредов с различной массовой долей жира (от 39 до 82 %).

В эмульгаторах была определена температура плавления, жирнокислотный состав, йодное число и содержание твердых триглицеридов при различных температурах.

Определение температуры плавления жиров и эмульгаторов осуществлялось при постоянном постепенном нагревании охлажденного жира (эмульгатора) до момента его расплавления, характеризующегося прозрачностью и подвижностью. Метод основан на фиксации температуры плавления по поднятию расплава эмульгатора в капилляре, открытом с двух концов с диаметром 0,1 мм. Определение проводили в трехкратной повторности, т. к. температура плавления для каждого вида эмульгатора является точной величиной и чувствительна к присутствию примесей. В результате этого можно идентифицировать эмульгатор и определить его чистоту.

Жирнокислотный состав исследуемых эмульгаторов определяли методом, основанным на получении хроматограммы метиловых эфиров жирных кислот с последующей идентификацией разделяемых компонентов и их количественном определении по площади пиков. Каждый компонент смеси метиловых эфиров жирных кислот характеризуется конкретным временем удержания – от момента ввода пробы до появления максимума пика на хроматограмме. Время удержания является измеряемой величиной и составляет, например, для пальмитата 16,886 мин, для олеата 20,604 мин. Смеси жирных кислот, которые не способны димеризоваться, перед исследованием переводят в более легколетучие метиловые эфиры. Кроме этого, хроматографирование метиловых эфиров насыщенных и ненасыщенных жирных кислот с одинаковым количеством углеродных атомов облегчается. Определение проводили на газожидкостном хроматографе Agilent 7890A. Обработка данных выполнена системой Полихром.

Исследование содержания твердых триглицеридов в эмульгаторах в определенном диапазоне температур проводили методом ядерно-магнитного резонанса по ГОСТ 31757-2012 на аппарате Bruker Minispec MQ20.

Для измерения массовой доли твердых триглицеридов использовали радиоимпульс (диапазон частот от 20 до 40 МГц), который направляется относительно магнитного поля под углом 90°. Магнитное поле создается постоянным магнитом. Однородность поля магнита должна обеспечить полупериод спада намагниченности образца жидкого жира не менее 1000 мкС. Перед проведением анализа проводили пробоподготовку: эмульгатор расплавляли при температуре на 5 °С выше его температуры плавления (присутствие влаги в образце недопустимо). Расплавленным жиром (эмульгатором) заполняли ампулы (диаметром 10 мм) на высоту 2–2,5 см. Ампулы помещали в термостат при температуре 80 °С и выдерживали 30 мин. Затем ампулы охлаждали в металлическом блоке при температуре 0 °С в течение 30 мин. Далее помещали ампулы в металлические блоки термостатов с температурой 5, 10, 15, 20, 25, 30 и 35 °С и выдерживали 20 мин. Далее пробирки переносили в измерительную ячейку ЯМР-анализатора. Результаты измерения фиксировали на приборе дисплея после нажатия клавиши Enter. Расхождение между параллельными измерениями не превышало 0,5 %.

Йодное число в эмульгаторах определяли по ГОСТ ISO 3961-2020.

Сведения о гидрофильно-липофильном балансе (ГЛБ) исследуемых эмульгаторов были получены из спецификаций производителей. Для исследований были отобраны следующие образцы: гидролизованный лецитин (ГЛБ 8); мягкие моно- и диглицериды (ГЛБ 4); твердые моно- и диглицериды (ГЛБ 3); фракционированный лецитин (ГЛБ 2). Гидрофильно-липофильный баланс смоделированных комплексных эмульгаторов был определен путем сложения ГЛБ отдельных эмульгаторов, умноженных на массовую долю эмульгатора в смеси.

Таблица 1. Характеристика природных и искусственных пищевых эмульсий

Table 1. Natural and artificial food emulsions

Показатели качества эмульсионных продуктов	Молоко	Спред низкожирный	Масло сливочное	Спред высокожирный
Массовая доля жира, %	2,8–4,8	39–60	60–82	60–80
Тип эмульсии	Прямая	Обратная	Обратная	Обратная
Вид эмульсии	Тонкодисперсная	Тонкодисперсная	Грубодисперсная	Тонкодисперсная
Размер частиц дисперсной фазы, мкм	5–7	3–5	20–30	3–5
Эмульгаторы	Белки Фосфолипиды	Моно- и диглицериды Лецитин	Фосфолипиды	Моно- и диглицериды Лецитин

Результаты и их обсуждение

В таблице 1 представлена характеристика различных пищевых эмульсий. Молоко и масло сливочное являются эмульсиями, стабилизированными природными фосфолипидами (сфингомиелинами), содержащимися в молочном жире. Сливочно-растительные спреды, произведенные с правильно подобранными поверхностно-активными веществами, отличаются не меньшей, а иногда даже большей стабильностью, чем эмульсии, содержащие естественные поверхностно-активные вещества.

Многокомпонентность водной и жировой фаз, природа и концентрация эмульгатора, технологические условия диспергирования оказывают влияние на стойкость получаемых эмульсий [26, 27]. На рисунке 1 представлена модель поведения различных эмульгаторов на границе раздела водной и жировой фаз в зависимости от преобладания в эмульгаторе количества липофильных или гидрофильных групп [28].

Значение гидрофильно-липофильного баланса эмульгатора определяет возможность его применения для эмульсий различных типов. Для эмульсии вода в масле (обратного типа) необходимо использовать эмульгатор с ГЛБ от 2 до 6, где доля гидрофильных групп составляет от 10 до 30 %. Эмульгатор с таким значением ГЛБ необходимо растворять в масле или многокомпонентной жировой фазе. При производстве эмульсий масло в воде, относящихся к прямому типу, необходимо подбирать эмульгатор с высоким значением ГЛБ (в интервале от 10 до 14). В составе таких эмульгаторов доля гидрофобных групп составляет от 30 до 50 %. Для получения стойких эмульсии данного типа эмульгатор необходимо диспергировать в водной или молочной фазах.

Зависимость типа получаемой эмульсии от соотношений гидрофильных и гидрофобных групп в химической структуре эмульгатора представлена в таблице 2.

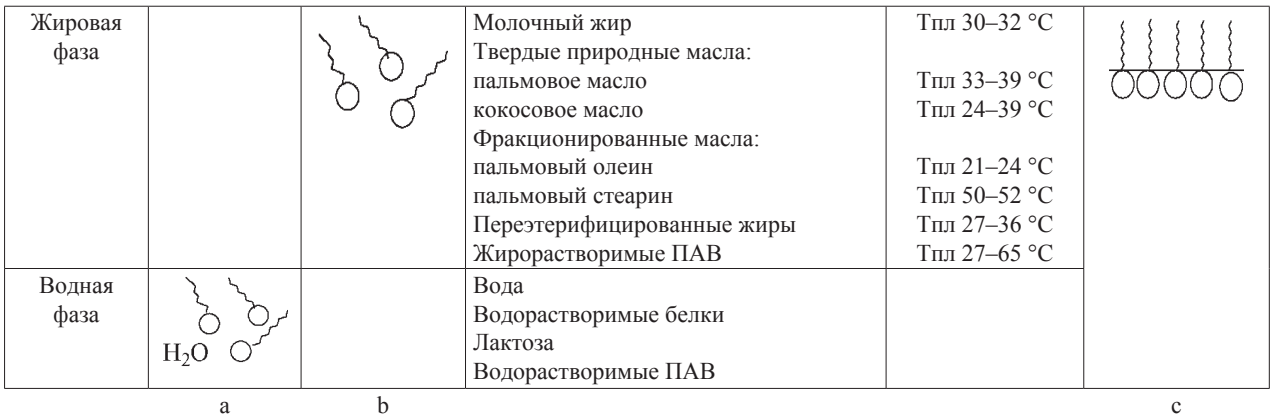


Рисунок 1. Поведение дифильного эмульгатора на границе масло – вода:
a – с преобладающими гидрофильными свойствами; b – с преобладающими липофильными свойствами;
c – со сбалансированными гидрофильными и липофильными свойствами

Figure 1. Diphilic emulsifier at the oil-water interface: a – with predominant hydrophilic properties;
b – with predominant lipophilic properties; c – with balanced hydrophilic and lipophilic properties

Таблица 2. Взаимосвязь между строением ПАВ и типом получаемых эмульсий

Table 2. Effect of surfactant structure on the type of emulsions

	ПАВ для обратных эмульсий	ПАВ для смешанных эмульсий	ПАВ для прямых эмульсий
Доля гидрофобных групп, %	90	70	60
Доля гидрофильных групп, %	10	30	40
Гидрофильно-липофильный баланс	2	6	8
Типы получаемых эмульсии	Вода в масле	Вода в масле Масло в воде	Масло в воде

Система выбора эмульгатора на основе ГЛБ включает три этапа:

– определение оптимального значения ГЛБ для планируемого продукта;

– определение лучших видов эмульгаторов;

– окончательная корректировка ГЛБ.

В этой процедуре эмульгаторы и смеси со значениями ГЛБ вне установленного интервала могут быть отброшены для сокращения количества испытаний при использовании метода проб и ошибок. Определение наилучшего значения ГЛБ включает следующие шаги:

1. Выбор подходящей пары эмульгаторов (один липофильный, другой гидрофильный) с известными значениями. Например, моно- и диглицериды с ГЛБ 3 являются липофильными поверхностно-активными веществами, а гидролизованный лецитин с ГЛБ 10 – гидрофильным.

2. Приготовление серии опытных эмульсий с выбранными эмульгаторами, которые смешиваются таким образом, чтобы получить различные значения ГЛБ, начиная от полностью липофильного и заканчивая полностью гидрофильным веществом. Для двух поверхностно-активных веществ, предложенных на первом шаге, интервал значений ГЛБ будет от 3 до 10. Смесь эмульгаторов должна использоваться в избыточном количестве или составлять около 10–12 % от содержания жира в конечном продукте.

3. Оценка полученной серии смесей эмульгаторов с использованием подходящих методов оценки функциональной эффективности, основанных на требованиях к продукту. С одной или несколькими смесями эмульгаторов будут получаться лучшие эмульсии, чем с остальными. Но если все смеси оказываются хорошими, то нужно повторить серию испытаний с более низкой дозировкой смеси эмульгаторов. Если все смеси дают плохие результаты нужно повысить дозировку и повторить серию.

4. Окончательные результаты испытаний должны указать с точностью до 2 единиц интервал ГЛБ, который будет наилучшим для конечного продукта. Более точное значение ГЛБ можно определить с помощью следующей серии испытаний со значениями ГЛБ, входящими в этот интервал.

Подходящий химический тип поверхностно-активных веществ является столь же важным, как и значение ГЛБ. После установления значения ГЛБ нужно определить, не будет ли какая-то другая смесь эмульгатора работать лучше, не будет ли она более эффективной или более экономически выгодной при том же значении ГЛБ.

Цель проведения этих испытаний заключается в выборе нескольких пар эмульгаторов, охватывающих широкое разнообразие химических соединений. Оценка функциональной эффективности этих смесей является основой для выбора идеальной смеси эмульгаторов для конкретного продукта.

Для производства спредов различной жирности при помощи вышеприведенного алгоритма были подобраны пары эмульгаторов с различным значением гидрофильно-липофильного баланса. В таблице 3 представлены характеристики выбранных эмульгаторов и подобранные дозировки для эмульсионных продуктов с различной массовой долей жира.

Как отмечалось выше, понятие гидрофильно-липофильного баланса позволяет получить полезную информацию, в том числе рассчитать его значения для смесей эмульгаторов и составить таблицы экспериментально полученных значений ГЛБ. Однако метод ГЛБ не является совершенной

Таблица 3. Характеристика эмульгаторов для спредов различной жирности

Table 3. Emulsifiers for spreads of different fat content

Спред	Эмульгатор	ГЛБ	Доля липофильных групп	Количество эмульгатора, %
Спред сливочно-растительный с м.д.ж. 40 %	Гидролизованный лецитин Моно- и диглицериды	8 4	40 20	0,3 0,6
Спред сливочно-растительный с м.д.ж. 80%	Фракционированный лецитин Моно- и диглицериды	2 4	10 20	0,2 0,4

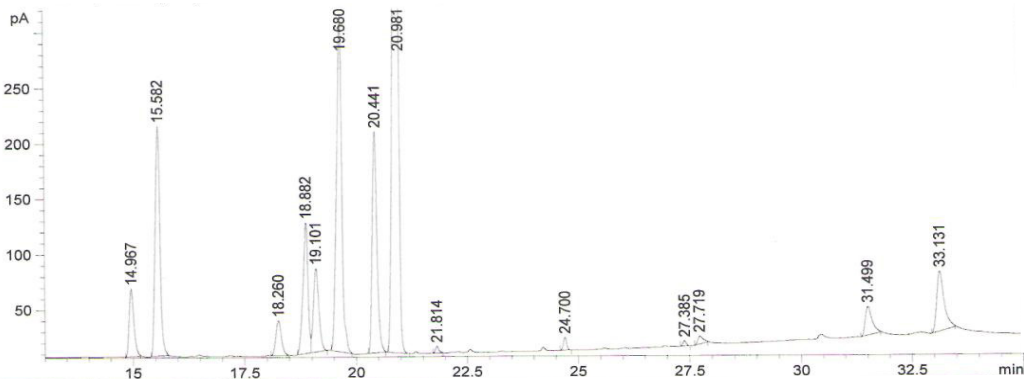


Рисунок 2. Хроматограмма метиловых эфиров жирных кислот эмульгатора Е471 (твердые моно- и диглицериды)

Figure 2. Chromatogram of methyl esters of fatty acids in emulsifier E471 (solid mono- and diglycerides)

системой выбора поверхностно-активных веществ, поскольку не учитывает другие важные факторы, в том числе молекулярную массу поверхностно-активного вещества, температуру плавления и условия растворения. Например, по ГЛБ невозможно получить информацию о кристаллизационных свойствах моноглицеридов и их производных. Тем не менее понятие ГЛБ хорошо себя зарекомендовало как полезный инструмент для формирования общего представления о вероятных свойствах эмульгаторов и их смесей.

Соотношение твердых и жидких триглицеридов в композициях жиров и масел, входящих в состав жировой основы пищевых эмульсий, а также присутствие в смеси комплекса эмульгаторов в различных соотношениях может оказать влияние на технологический процесс образования пищевых эмульсий. В связи с этим были изучены жирнокислотный состав и свойства выбранных эмульгаторов, а также их влияние на модификацию кристаллов в процессе переохлаждения пищевых эмульсий.

На процесс кристаллизации эмульсии может оказывать влияние несколько факторов, в том числе присутствие в жировой фазе эмульгатора. Он являясь высокоплавким ингредиентом, выполняет функцию центра кристаллизации, способствуя агломерации и росту кристаллов в дисперсионной системе.

В процессе производства эмульгаторов используются твердые природные и модифицированные масла, а также жиры или жирные кислоты разной степени чистоты.

Идентификация липидной фазы эмульгатора может быть проведена на основании изучения ее жирнокислотного состава методом газожидкостной разделительный хроматографии. Данная методика позволяет быстро и качественно выполнить количественный анализ исследуемого сырья.

Хроматограммы, характеризующие жирнокислотный состав исследованных эмульгаторов, представлены на рисунках 2, 4 и 5.

Данные хроматограммы, представленной на рисунке 2, свидетельствуют о том, что в составе твердых моно- и диглицеридов преобладают насыщенные жирные кислоты: количество пальмитиновой кислоты составляет 30–40 %, стеариновой – 50–60 %.

Особенности жирнокислотного состава эмульгатора обусловлены, с одной стороны, спецификой состава жирового сырья, используемого при получении моноглицеридов, а с другой – химизмом и технологическими условиями процесса переэтерификации триацилглицеринов глицерином (глицеролизом) или этерификации глицерина жирными кислотами.

При производстве моноглицеридов путем глицеролиза модифицированных жиров дистиллированным глицерином полученная смесь продуктов реакции центрифугируется и подвергается молекулярной дистилляции. В качестве сырья используются твердые жиры, полученные гидрированием с температурой плавления от 55 до 80 °С и йодным числом от 1 до 3 г I_2/100 г. В качестве катализатора используют оксид кальция. Процесс переэтерификации триацилглицеринов дистиллированным глицерином происходит следующим образом:

$$\begin{array}{l} CH_2OCOR_1 \\ | \\ CH_2OCOR_2 \\ | \\ CH_2OCOR_3 \end{array} + 2 \begin{array}{l} CH_2OH \\ | \\ CHOH \\ | \\ CH_2OH \end{array} \overset{kat}{\rightleftarrows} \begin{array}{l} CH_2O\text{-}COR_{123} \\ | \\ CHOH \\ | \\ CH_2OH \end{array}$$

модифицированный жир (стеариновая фракция) — *глицерин* — *моноглицерид*

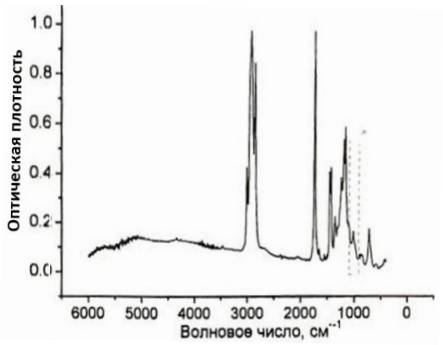


Рисунок 3. ИК-спектр транс метил олеата

Figure 3. IR spectrum of trans methyl oleate

При получении эмульгатора этерификацией используют дистиллированный глицерин и дистиллированную стеариновую кислоту.

$$\begin{array}{lcccl} CH_2OH & & & & CH_2O\text{-}COR_{123} \\ | & & & & | \\ CHOH & + & RCOOH & \overset{kat}{\rightleftarrows} & CHOH \quad + H_2O \\ | & & & & | \\ CH_2OH & & & & CH_2OH \\ \textit{глицерин} & & \textit{стеариновая кислота} & & \textit{моноглицерид} \end{array}$$

Наряду с образованием моноглицеридов получается определенное количество диглицеридов. Бо́льший избыток глицерина способствует бо́льшему образованию моноглицеридов.

В связи с протеканием процесса при температуре 210–220 °С в присутствии катализатора (0,3 %) и остаточном давлении 30–35 кПа образуется небольшое количество транс-изомеризованых жирных кислот, содержание которых в готовом продукте составляет от 2 до 4 %.

Определение количества элаидиновой кислоты, которая является транс-изомером олеиновой кислоты, осуществляли методом ИК-Фурье спектроскопии диффузионного отражения. Процесс каталитической переэтерификации и глицеролиза сопровождается транс-изомеризацией и перемещением двойных связей в молекулах жирных кислот. Эти химические превращения приводят к увеличению твердости и температуры плавления липидной фазы. Характерной особенностью непредельных соединений с изолированный транс-этиленовой связью является интенсивная полоса поглощения области 968 см$^{-1}$. Определение проводили на спектрометре Shimadzu FTIR8300, оснащенном приставкой диффузионного отражения DRS 8000. ИК-спектры были записаны в интервале 400–6000 см$^{-1}$, анализировали интервал числа частот 900–1060 см$^{-1}$ (рис. 3).

Анализируемый образец смеси метиловых эфиров жирных кислот (табл. 4) помещали на матовое зеркало кюветы приставки диффузионного отражения. Затем образец высушивали потоком воздуха до образования равномерной пленки на поверхности. Данная методика позволяет уменьшить влияние растворителя на оптическую плотность исследуемой смеси. Оптическая плотность образца (A_{ob}) в области 966 см$^{-1}$ выражается как сумма оптической плотности транс С=С двойной связи (A_{tr}) и оптической плотности всех остальных компонентов в этой области (A_{av}).

$$A = A_{av} + A_{tr}$$

Доля транс метил олеата в смеси рассчитывается по формуле:

$$C_{tr} = 0{,}37 \cdot (A_{ob}/A_{av} - 1), \text{ мольная доля}$$

где 0,37 – множитель калибровки данных ИКС.

Жирнокислотный состав мягких моноглицеридов характеризуется высоким содержанием ненасыщенных жирных кислот. В образце присутствует олеиновая кислота, в том числе в транс-изомеризованной конфигурации.

Композиционный эмульгатор «моноглицериды/лецитины» получали смешиванием двух фракций в соотношении от 3:1 до 5:1 соответственно. Смесь тщательно перемешивали при температуре 75–85 °С и охлаждали. Фосфолипидный комплекс, в котором преобладают лецитины (60 %), проявляет

Таблица 4. Компонентный состав метиловых эфиров мягких моно- и диглицеридов жирных кислот

Table 4. Methyl esters of soft mono- and diglycerides of fatty acids

Компонентный состав					
Вещество	Время, мин	Концентрация, %	Площадь, мВ·мин	Высота, мВ	Ширина, мин
1 Пальмитат	16,884	12,262075	4,661	43,654	0,45
2 Стеарат	19,515	6,946059	2,640	18,213	0,338
3 Олеат	19,97	76,142850	28,944	107,07	0,578
4 Линолеат	20,604	2,689341	1,022	4,256	0,432
6	22,206	0,245211	0,093	0,142	0,702
7	23,269	1,714464	0,652	0,844	1,625
Итого		100,00000	38,012	174,45	

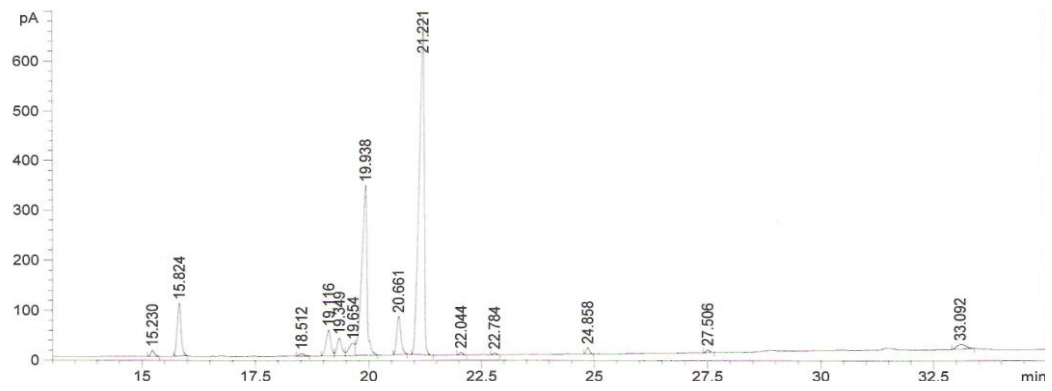


Рисунок 4. Хроматограмма метиловых эфиров жирных кислот эмульгатора Е471 (мягкие моно- и диглицериды)

Figure 4. Chromatogram of methyl esters of fatty acids of emulsifier E471 (soft mono- and diglycerides)

наилучшие гидрофильные свойства, хорошо удерживает влагу, переходя при взаимодействии с водой в гидратированные формы, что способствует приобретению антиразбрызгивающих свойств. Кроме этого, композиционный эмульгатор улучшает пластические свойства эмульсионных продуктов и прочно удерживает влагу при повышении температуры окружающей среды. Результаты определения жирнокислотного состава композиционного эмульгатора представлены на рисунке 5.

В композиционном эмульгаторе из-за присутствия в нем фосфолипидов были идентифицированы ненасыщенные жирные кислоты: олеиновая и линоленовая.

На следующем этапе исследовали йодное число эмульгаторов. Оно является показателем, характеризующим степень непредельности жирных кислот, входящих в состав жиров и масел, или липидной части жиросодержащего компонента (эмульгатора). Йодное число показывает количество граммов йода, эквивалентное галогену, который присоединяется по месту двойных связей к жирным кислотам в 100 г жира.

Создавая определенные условия, можно полностью насыщать непредельные связи жирных кислот. В лабораторных условиях в качестве галогенов используют бром и йод. Реакция протекает в строго определенных условиях и требует избытка галогена и ограниченного времени насыщения из-за высокой активности реагентов и проведения реакции без доступа света.

При определении йодного числа эмульгаторов был использован метод Вийса, который основан на применении хлор йода в ледяной уксусной кислоте в качестве галогенреагента. Следует отметить, что хлористый йод в уксусной кислоте

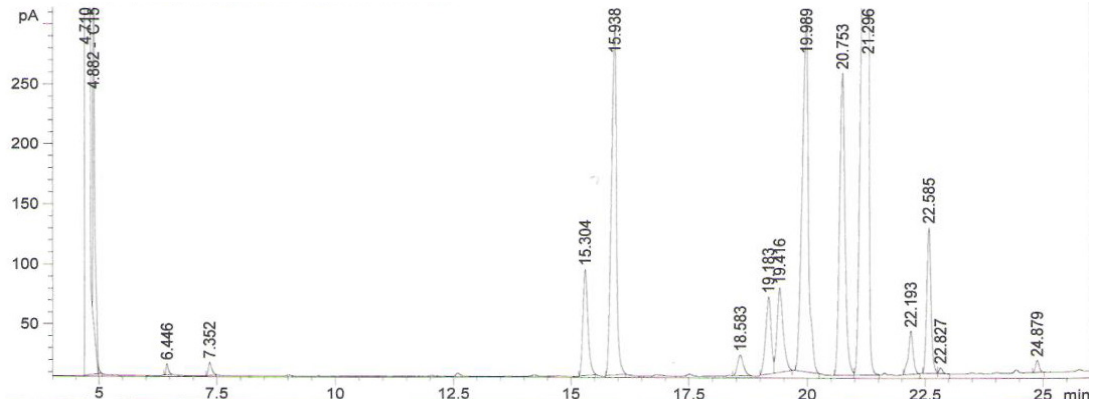


Рисунок 5. Хроматограмма метиловых эфиров жирных кислот композиционного эмульгатора «моноглицериды/лецитины»

Figure 5. Chromatogram of methyl esters of fatty acids of the composite emulsifier “monoglycerides/lecithins”

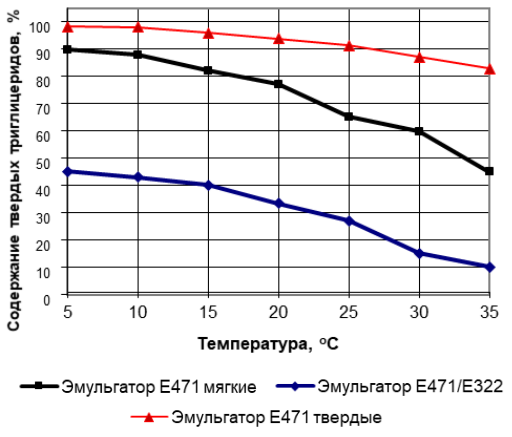


Рисунок 6. Результаты исследования содержания твердых триглицеридов в эмульгаторах

Figure 6. Composition of solid triglycerides in emulsifiers

Таблица 5. Характеристика процесса переохлаждения эмульсии в процессе производства спредов с использованием различных эмульгаторов

Table 5. Emulsion overcooling in spreads production for various emulsifiers

Продукт	Температура переохлаждения (кристаллизации), °С	Время фазового перехода (кристаллизации), мин
Спред с мягкими моноглицеридами (м.д.ж. 72 %)	12 2	18 12
Спред с твердыми моноглицеридами (м.д.ж. 72 %)	12 2	14 10
Спред с моноглицеридами и лецитином (м.д.ж. 72 %)	12 2	16 11

обладает наивысшей активностью по сравнению со спиртовым раствором. Данная активность галогена обеспечивает полное насыщение непредельных связей. В приготовленном реагенте недопустим избыток свободного хлора, но необходимо, чтобы йод был в небольшом избытке. Это обеспечивает протекание реакции насыщения, а замещение водорода в углеродной цепи не происходит. При методе Вийса протекают следующие реакции:

$$I_2 + Cl_2 \rightarrow 2ClI$$

$$...\text{-}CH{=}CH\text{-}... + ClI \rightarrow \text{-}CHCl\text{-}CHI$$ – фрагмент непредельной жирной кислоты

Результаты определения йодного числа эмульгаторов представлены в таблице 6.

Важной технологической характеристикой липидных систем является содержание твердых триглицеридов. Эмульгаторы должны обладать высокой термической стабильностью, а гранулы должны быть однородными. Содержание твердой фазы при температуре 35 °С должно быть не менее 5 %.

На рисунке 6 представлено содержание твердых триглицеридов при различных температурах в исследуемых эмульгаторах.

Содержание твердых триглицеридов исследуемых эмульгаторов при 35 °С составило от 10 % у мягких моноглицеридов до 80 % у твердых.

Температура плавления эмульгатора имеет важное практическое значение в технологии производства пищевых эмульсий, в том числе для производства спредов. Кроме того, подготовка эмульгатора осуществляется путем растворения его в масле при температуре на 10–12 °С выше его температуры

Таблица 6. Показатели качества эмульгаторов, используемых в технологии производства спредов

Table 6. Quality indicators of emulsifiers used in spread production

Показатели	Моно- и диглицериды ненасыщенные (Е471)	Моно- и диглицериды насыщенные (Е471)	Композиции моно- и диглицеридов и лецитина (Е471/Е322)
Функциональные группы, определяющие гидрофильность	-COOH -OH	-COOH -OH	$-NH_2$ -COOH -OH
Растворимость эмульгатора	Растворимы в липидной фазе		
Соотношение масло:эмульгатор при растворении	8:1	10:1	6:1
Температура плавления эмульгатора, °С	40	80	50
Йодное число (степень насыщенности), г I_2/100 г	65	3	36
Количество моноглицеридов, %	45	80	60
Соотношений компонентов эмульгатора	–	–	3:1
Гидрофильно-липофильный баланс	4	3	4

плавления. Результаты определения температуры плавления исследуемых эмульгаторов представлены в таблице 6.

На следующем этапе изучали влияние состава эмульгатора на кристаллизационные свойства эмульсионных продуктов (спредов).

В лабораторных условиях было получено 6 образцов сливочно-растительных спредов, в липидной фазе которых использован молочный жир (50 %), пальмовое масло (10 %), заменитель молочного жира (20 %) и подсолнечное масло, рафинированное по полному циклу (10 %). Продукт изготовлен с жирностью 72 %. Дозировка эмульгаторов (моноглицериды мягкие, моноглицериды твердые, лецитины), вносимых в рецептуру спреда, составила от 0,6 до 0,9 %.

Процесс переохлаждение пищевой эмульсии проводили в двух температурных режимах:
– охлаждения холодной водой (12–13 °С);
– охлаждение ледяным рассолом (0–2 °С).

Результаты исследований представлены в таблице 5.

Переход пищевой эмульсии из жидкого состояния в твердое происходит не мгновенно, а в определенном интервале времени и температуры. Это обусловлено многокомпонентностью триацилглицеринов липидной фазы, включающей природные масла и жиры, подвергнутые модификации. На образование кристаллической структуры продукта влияние оказывают специфические особенности глицеридов, жирнокислотный состав и количественное содержание твердой фазы в эмульгаторе. Самая высокая скорость кристаллизации наблюдалась в образцах спредов с использованием твердых моноглицеридов, характеризующихся высокой степенью насыщенности и наибольшим содержанием твердой фазы при температуре 12 °С.

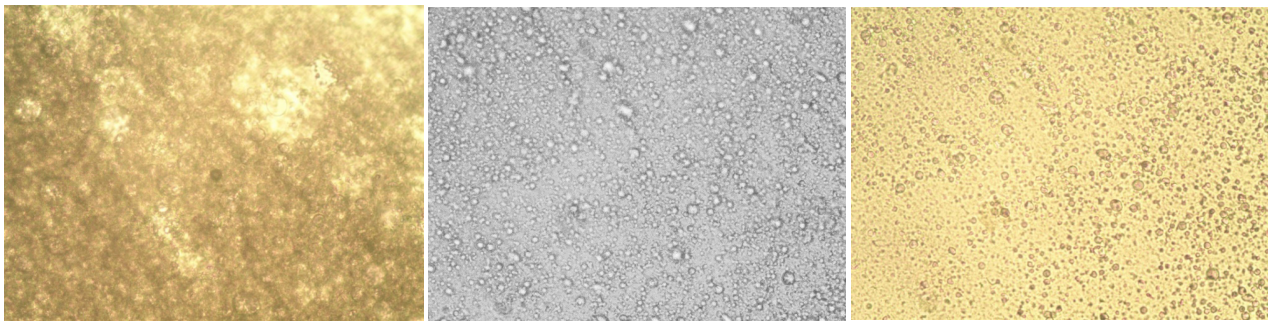
Анализ данных по формированию кристаллической структуры показывает, что время фазового перехода эмульсии в твердое состояние зависит и от температуры процесса.

Исследование органолептических свойств (внешний вид, консистенция, намазываемость) полученных образцов спредов с различными эмульгаторами показало, что внесение в рецептуры пищевых эмульсий твердых моноглицеридов высокой степени насыщенности, характеризующихся низким йодным числом и высокой температурой плавления, способствовало образованию конденсационно-кристаллизационной структуры. В ней кристаллы липидной фазы, срастаясь между собой, образуют твердый каркас. Также наблюдалось образование нескольких кристаллов из одного центра. Образцы не восстанавливались после механического разрушения. Образованная эмульсия характеризовалась повышенной твердостью, крошливой консистенцией и неудовлетворительной пластичностью.

Использование при производстве пищевых эмульсий в качестве эмульгатора мягких моноглицеридов обеспечило получение стабильной коагуляционной структурированной системы, где кристаллы жира сцеплены между собой слабым взаимодействием через тонкие пленки водной среды. Такая эмульсия имеет высокую степень пластичности и достаточное количество тиксотропна. Использование мягких моноглицеридов обеспечивает хорошую намазываемость спреда с массовой долей жира от 39 до 60 %.

Использование композиционной эмульгирующей системы «моноглицериды/лецитин» позволило получить смешанные модификации с оптимальным балансом коагуляционных и кристаллизационных структур. Это обеспечивает продукту достаточную плотность и пластичность.

Были выполнены микроскопические исследования полученных образцов спредов в светлом поле. На рисунке 7 изображены микрофотографии образцов,



a b c

Рисунок 7. Микрофотографии образцов спредов, полученных с использованием твердых (a) и мягких моноглицеридов (b), а также смеси моноглицеридов и лецитина (c)

Figure 7. Micrographs of spread samples obtained using solid monoglycerides (a), soft monoglycerides (b), and a mix of monoglycerides and lecithin (c)

полученных с использованием твердых и мягких моноглицеридов, а также смеси моноглицеридов с лецитином.

На рисунке 7а видны большие неправильные агломераты сросшихся кристаллов жировой фазы. На рисунках 7b и 7c видны отдельные сферические капли жировой фазы, равномерно распределенные в дисперсионной среде.

Таким образом, состав и свойства эмульгатора для пищевых эмульсий оказывает существенное влияние на дисперсность, стойкость эмульсии и формирование кристаллической структуры.

Твердые насыщенные моноглицериды с низким йодным числом оказывают влияние на укрепление кристаллической структуры эмульсионного продукта, тем самым предотвращая отделение жидких компонентов липидной фазы (растительного масла). Их рекомендуется использовать при производстве спредов высокой жирности (80–82 %). Мягкие моноглицериды, в жирнокислотном составе которых количество ненасыщенных жирных кислот выше, чем в твердых моноглицеридах, рекомендуется использовать при получении спредов низкой жирности до 60 %.

Для формирования рекомендаций по способу подготовки эмульгатора к внесению в состав пищевой эмульсии опытным путем был осуществлен подбор соотношений жидкого растительного масла и эмульгатора. Эмульгаторы растворялись в рафинированном дезодорированном растительном масле при температуре на 5–7 °С выше температуры плавления эмульгатора при соотношений масло:эмульгатор от 6:1 до 10:1.

В таблице 6 систематизированы физико-химические показатели и показатели эмулирующей активности, которые необходимо учитывать при выборе поверхностно-активных веществ для производства спредов.

Таким образом, жирнокислотный состав, степень насыщенности, температура плавления и содержание твердых триглицеридов в эмульгаторах и их смесях определяют скорость роста кристаллов и размер жировых шариков в эмульсии, т. е. степень ее дисперсности, а также полиморфную форму жира. Владение информации о физико-химических показателях эмульгаторов позволяет варьировать соотношение компонентов эмульгирующих композиций, а также их дозировки для достижения требуемых свойств получаемых пищевых эмульсий.

Выводы

На основании проведенных исследований предложен перечень технологических и физико-химических показателей эмульгаторов, по которым следует их оценивать перед использованием в производстве пищевых эмульсий.

В связи с использованием в производстве эмульгаторов различных модифицированных жиров, в том числе полученных методом гидрирования, нужно определять содержание транс-изомеров жирных кислот в эмульгаторах, т. к. они относятся к нормируемым показателям безопасности при определении качества эмульсионных продуктов, в том числе спредов. Температуру плавления необходимо определять для корректировки технологического этапа подготовки раствора эмульгатора. Предложено растворение эмульгатора в рафинированном дезодорированном растительном масле при температуре на 5–7 °С выше температуры плавления эмульгатора при соотношений масло:эмульгатор от 6:1 до 10:1. Установлено влияние йодного числа, содержания твердых триглицеридов и жирно-кислотного состава эмульгаторов и их композиций на образование кристаллизационных структур. В ходе проведенных исследований показано, что при выборе эмульгатора также необходимо учитывать показатель гидрофильно-липофильного баланса, т. к. доля гидрофильных и гидрофобных групп в поверхностно-активных веществах влияет на тип получаемых эмульсий и позволяет корректировать жирность готового продукта.

Данные, полученные в результате исследования, позволяют расширить теоретические основы создания пищевых эмульсий путем разработки научно обоснованных рекомендаций по подбору поверхностно-активных веществ и открывают перспективы дальнейших исследований свойств различных эмульгаторов и их влияния на качество готовых пищевых эмульсий.

Критерии авторства

Л. В. Терещук – общая редакция рукописи, разработка плана исследования, получение фактического материала. К. А. Загородников и П. А. Вьюшинский – получение фактического материала. К. В. Старовойтова – обзор литературы по теме исследования, методология исследования, получение фактического материала.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

L.V. Tereshchuk edited the manuscript, developed the research plan, and obtained the research material. K.A. Zagorodnikov and P.A. Viushinskij obtained the research material. K.V. Starovoitova reviewed the publications, developed the research methodology, and obtained the research material.

Conflict of interest

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

Список литературы

1. Арасова Л. И., Тагиева Т. Г., Завадская И. М. К вопросу оценки эффективности пищевых ПАВ для эмульсионной продукции масложирового ассортимента // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров. 2019. № 1–2. С. 39–43.

2. Tereshchuk L. V., Starovoytova K. V., Ivashina O. A. Practical aspects of the use of emulsifiers in manufacturing emulsion fat-and-oil products // Foods and Raw Materials. 2018. Vol. 6. № 1. P. 30–39. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-30-39.

3. Топникова Е. В., Лепилкина О. В., Коноплева А. А. Влияние эмульгаторов на реологические свойства спредов // Переработка молока. 2014. Т. 179. № 9. С. 44–46.

4. Monoacylglycerols in dairy recombined cream: II. The effect on partial coalescence and whipping properties / E. Fredrick // Food Research International. 2013. Vol. 51. № 2. P. 936–945. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.006.

5. Fredrick E., Walstra P., Dewettinck K. Factors governing partial coalescence in oil-in-water emulsions // Advances in Colloid and Interface Science. 2010. Vol. 153. № 1–2. P. 30–42. https://doi.org/10.1016/j.cis.2009.10.003.

6. Petrut R. F., Danthine S., Blecker C. Assessment of partial coalescence in whippable oil-in-water food emulsions // Advances in Colloid and Interface Science. 2016. Vol. 229. P. 25–33. https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.12.004.

7. Study of the biofunctional properties of cedar pine oil with the use of *in vitro* testing cultures / A. Yu. Prosekov [et al.] // Foods and Raw Materials. 2018. Vol. 6. № 1. P. 136–143. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-136-143.

8. Ali F., Wang J., Ullah N. Oil/fat blending strategy for improving milk fat globule membrane stability and its effect on fatty acid composition // International Journal of Dairy Technology. 2019. Vol. 72. № 4. P. 496–504. https://doi.org/10.1111/1471-0307.12604.

9. Habashi V., Elhamirad A. H., Pedramnia A. Textural properties of low fat mayonnaise with whey protein concentrate and Tragacanth gum as egg and fat substitutes // Foods and Raw Materials. 2021. Vol. 9. № 1. P. 19–23. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-19-23.

10. Tippetts M., Martini S. Effect of cooling rate on lipid crystallization in oil-in-water emulsions // Food Research International. 2009. Vol. 42. № 7. P. 847–855. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.03.009.

11. Relating crystallization behavior of monoacylglycerols-diacylglycerol mixtures to the strength of their crystalline network in oil / I. Tavernier [et al.] // Food Research International. 2019. Vol. 120. P. 504–513. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.092.

12. Influence of cooling rate on partial coalescence in natural dairy cream / K. Moens [et al.] // Food Research International. 2019. Vol. 120. P. 819–828. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.11.044.

13. Loi C. C., Eyres G. T., Birch E. J. Effect of mono- and diglycerides on physical properties and stability of a protein-stabilised oil-in-water emulsion // Journal of Food Engineering. 2019. Vol. 240. P. 56–64. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.07.016.

14. Moens K., Tavernier I., Dewettinck K. Crystallization behavior of emulsified fats influences shear-induced partial coalescence // Food Research International. 2018. Vol. 113. P. 362–370. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.005.

15. Doğan M., Göksel Saraç M., Aslan Türker D. Effect of salt on the inter-relationship between the morphological, emulsifying and interfacial rheological properties of O/W emulsions at oil/water interface // Journal of Food Engineering. 2018. Vol. 275. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109871.

16. Technical emulsifiers in aerosol whipping cream – Compositional variations in the emulsifier affecting emulsion and foam properties / M. Blankart [et al.] // International Dairy Journal. 2020. Vol. 102. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.104578.

17. Jadhav H., Waghmare J., Annapure U. Effect of mono and diglyceride of medium chain fatty acid on the stability of flavour emulsion // Food Research. 2021. Vol. 5. № 2. P. 214–220. https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(2).589.

18. Katsouli M., Tzia C. Effect of lipid type, dispersed phase volume fraction and emulsifier on the physicochemical properties of nanoemulsions fortified with conjugated linoleic acid (CLA): Process optimization and stability assessment during storage conditions // Journal of Molecular Liquids. 2019. Vol. 292. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111397.

19. Design of biosystems to provide healthy and safe food. Part A: effect of emulsifier and preparation technique on physicochemical, antioxidant and antimicrobial properties / B. Maherani [et al.] // European Food Research and Technology. 2018. Vol. 244. № 11. P. 1963–1975. https://doi.org/10.1007/s00217-018-3108-2.

20. Marhamati M., Ranjbar G., Rezaie M. Effects of emulsifiers on the physicochemical stability of oil-in-water nanoemulsions: A critical review // Journal of Molecular Liquids. 2021. Vol. 340. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117218.

21. Formation and stability of W/O-high internal phase emulsions (HIPEs) and derived O/W emulsions stabilized by PGPR and lecithin / P. K. Okuro [et al.] // Food Research International. 2019. Vol. 122. P. 252–262. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.028.

22. Effect of outer water phase composition on oil droplet size and yield of (w1/o/w2) double emulsions / A. K. L. Oppermann [et al.] // Food Research International. 2018. Vol. 107. P. 148–157. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.021.

23. Pathak M. Nanoemulsions and their stability for enhancing functional properties of food ingredients // Nanotechnology applications in food: Flavor, stability, nutrition and safety / editors A. E. Oprea, A. M. Grumezescu. Academic Press, 2017. P. 87–106. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811942-6.00005-4.

24. Fabrication of oil-in-water emulsions as shelf-stable liquid non-dairy creamers: Effects of homogenization pressure, oil type, and emulsifier concentration / Y. N. Soo [et al.] // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2021. Vol. 101. № 6. P. 2455–2462. https://doi.org/10.1002/jsfa.10871.

25. Novoselova M. V., Prosekov A. Yu. Technological options for the production of lactoferrin // Foods and Raw Materials. 2016. Vol. 4. № 1. P. 90–101. https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-1-90-101.

26. Yildirim M., Sumnu G., Sahin S. The effects of emulsifier type, phase ratio, and homogenization methods on stability of the double emulsion // Journal of Dispersion Science and Technology. 2017. Vol. 38. № 6. P. 807–814. https://doi.org/10.1080/01932691.2016.1201768.

27. Effect of oil content and emulsifier type on the properties and antioxidant activity of sea buckthorn oil-in-water emulsions / H. Zheng [et al.] // Journal of Food Quality. 2020. Vol. 2020. https://doi.org/10.1155/2020/1540925.

28. Effect of HLB value on the properties of chitosan/zein/lemon essential oil film-forming emulsion and composite film / Y. Sun [et al.] // International Journal of Food Science and Technology. 2021. Vol. 56. № 10. P. 4925–4933. https://doi.org/10.1111/ijfs.15216.

References

1. Tarasova LI, Tagijeva TG, Zavadskaja IM. To the question of evaluation of food SAS efficiency for the emulsion products of oil and fat product range. Vestnik of the All-Russia Scientific Research Institute of Fats. 2019;(1–2):39–43. (In Russ.).

2. Tereshchuk LV, Starovoytova KV, Ivashina OA. Practical aspects of the use of emulsifiers in manufacturing emulsion fat-and-oil products. Foods and Raw Materials. 2018;6(1):30–39. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-30-39.

3. Topnikova EV, Lepilkina OV, Konopleva AA. Vliyanie ehmul′gatorov na reologicheskie svoystva spredov [Effect of emulsifiers on the rheological properties of spreads]. Milk Processing. 2014;179(9):44–46. (In Russ.).

4. Fredrick E, Heyman B, Moens K, Fischer S, Verwijlen T, Moldenaers P, et al. Monoacylglycerols in dairy recombined cream: II. The effect on partial coalescence and whipping properties. Food Research International. 2013;51(2):936–945. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.006.

5. Fredrick E, Walstra P, Dewettinck K. Factors governing partial coalescence in oil-in-water emulsions. Advances in Colloid and Interface Science. 2010;153(1–2):30–42. https://doi.org/10.1016/j.cis.2009.10.003.

6. Petrut RF, Danthine S, Blecker C. Assessment of partial coalescence in whippable oil-in-water food emulsions. Advances in Colloid and Interface Science. 2016;229:25–33. https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.12.004.

7. Prosekov AYu, Dyshlyuk LS, Milent'eva IS, Pavsky VA, Ivanova SA, Garmashov SYu. Study of the biofunctional properties of cedar pine oil with the use of *in vitro* testing cultures. Foods and Raw Materials. 2018;6(1):136–143. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-136-143.

8. Ali F, Wang J, Ullah N. Oil/fat blending strategy for improving milk fat globule membrane stability and its effect on fatty acid composition. International Journal of Dairy Technology. 2019;72(4):496–504. https://doi.org/10.1111/1471-0307.12604.

9. Habashi V, Elhamirad AH, Pedramnia A. Textural properties of low fat mayonnaise with whey protein concentrate and Tragacanth gum as egg and fat substitutes // Foods and Raw Materials. 2021;9(1):19–23. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-19-23.

10. Tippetts M, Martini S. Effect of cooling rate on lipid crystallization in oil-in-water emulsions. Food Research International. 2009;42(7):847–855. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.03.009.

11. Tavernier I, Moens K, Heyman B, Danthine S, Dewettinck K. Relating crystallization behavior of monoacylglycerols-diacylglycerol mixtures to the strength of their crystalline network in oil. Food Research International. 2019;120:504–513. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.092.

12. Moens K, Tzompa-Sosa DA, Van de Walle D, Van der Meeren P, Dewettinck K. Influence of cooling rate on partial coalescence in natural dairy cream. Food Research International. 2019;120:819–828. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.11.044.

13. Loi CC, Eyres GT, Birch EJ. Effect of mono- and diglycerides on physical properties and stability of a protein-stabilised oil-in-water emulsion. Journal of Food Engineering. 2019;240:56–64. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.07.016.

14. Moens K, Tavernier I, Dewettinck K. Crystallization behavior of emulsified fats influences shear-induced partial coalescence. Food Research International. 2018;113:362–370. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.005.

15. Doğan M, Göksel Saraç M, Aslan Türker D. Effect of salt on the inter-relationship between the morphological, emulsifying and interfacial rheological properties of O/W emulsions at oil/water interface. Journal of Food Engineering. 2018;275. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109871.

16. Blankart M, Kratzner C, Link K, Oellig C, Schwack W, Hinrichs J. Technical emulsifiers in aerosol whipping cream – Compositional variations in the emulsifier affecting emulsion and foam properties. International Dairy Journal. 2020;102. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.104578.

17. Jadhav H, Waghmare J, Annapure U. Effect of mono and diglyceride of medium chain fatty acid on the stability of flavour emulsion. Food Research. 2021;5(2):214–220. https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(2).589.

18. Katsouli M, Tzia C. Effect of lipid type, dispersed phase volume fraction and emulsifier on the physicochemical properties of nanoemulsions fortified with conjugated linoleic acid (CLA): Process optimization and stability assessment during storage conditions. Journal of Molecular Liquids. 2019;292. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111397.

19. Maherani B, Khlifi MA, Salmieri S, Lacroix M. Design of biosystems to provide healthy and safe food. Part A: effect of emulsifier and preparation technique on physicochemical, antioxidant and antimicrobial properties. European Food Research and Technology. 2018;244(11):1963–1975. https://doi.org/10.1007/s00217-018-3108-2.

20. Marhamati M, Ranjbar G, Rezaie M. Effects of emulsifiers on the physicochemical stability of oil-in-water nanoemulsions: A critical review. Journal of Molecular Liquids. 2021;340. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117218.

21. Okuro PK, Gomes A, Costa ALR, Adame MA, Cunha RL. Formation and stability of W/O-high internal phase emulsions (HIPEs) and derived O/W emulsions stabilized by PGPR and lecithin. Food Research International. 2019;122:252–262. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.028.

22. Oppermann AKL, Noppers JME, Stieger M, Scholten E. Effect of outer water phase composition on oil droplet size and yield of (w1/o/w2) double emulsions. Food Research International. 2018;107:148–157. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.021.

23. Pathak M. Nanoemulsions and their stability for enhancing functional properties of food ingredients. In: Oprea AE, Grumezescu AM, editors. Nanotechnology applications in food: Flavor, stability, nutrition and safety. Academic Press; 2017. pp. 87–106. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811942-6.00005-4.

24. Soo YN, Tan CP, Tan PY, Khalid N, Tan TB. Fabrication of oil-in-water emulsions as shelf-stable liquid non-dairy creamers: Effects of homogenization pressure, oil type, and emulsifier concentration. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2021;101(6):2455–2462. https://doi.org/10.1002/jsfa.10871.

25. Novoselova MV, Prosekov AYu. Technological options for the production of lactoferrin. Foods and Raw Materials. 2016;4(1):90–101. https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-1-90-101.

26. Yildirim M, Sumnu G, Sahin S. The effects of emulsifier type, phase ratio, and homogenization methods on stability of the double emulsion. Journal of Dispersion Science and Technology. 2017;38(6):807–814. https://doi.org/10.1080/01932691.2016.1201768.

27. Zheng H, Mao L, Yang J, Zhang C, Miao S, Gao Y. Effect of oil content and emulsifier type on the properties and antioxidant activity of sea buckthorn oil-in-water emulsions. Journal of Food Quality. 2020;2020. https://doi.org/10.1155/2020/1540925.

28. Sun Y, Liu Z, Wang X, Zhang F, Huang X, Li J, et al. Effect of HLB value on the properties of chitosan/zein/lemon essential oil film-forming emulsion and composite film. International Journal of Food Science and Technology. 2021;56(10):4925–4933. https://doi.org/10.1111/ijfs.15216.