Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-3-252-259 Оригинальная статья/Research article
УДК 637.05 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Влияние микропартикулята сывороточных белков на стабилизацию пищевых эмульсий

Наталья Н. Антонова [1] soknat29@yandex.ru 0000-0002-9177-695X
Екатерина Б. Станиславская [1] tereshkova-katia@ya.ru 0000-0002-3474-2534
Елена И. Мельникова [1] melnikova@molvest.ru 0000-0002-0955-6238

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Концентраты сывороточных белков (КСБ) характеризуются значительным потенциалом для использования в рецептурах эмульсионных продуктов. Низкая термическая стойкость является ограничивающим фактором для их применения. Эта проблема может быть решена с помощью эмульсий Пикеринга, стабилизируемых частицами модифицированной формы сывороточных белков – микропартикулятом (МП). Целью работы было исследование влияния МП на термостабильность пищевых эмульсий. В работе использовались стандартные методы исследования. Применение КСБ стабилизировало эмульсию при массовой доле белка 2 %. Однако, уже при 4 % белка эмульсии легко коагулировали. Продолжительность периода термостабильности эмульсии с МП при массовой доле белка 2 % было относительно коротким. При увеличении концентрации белка до 4 % наблюдалось существенное увеличение термостабильности. Термостатированные эмульсии, приготовленные с использованием МП, до концентрации белка 12 % и КСБ до 4 % характеризовались ньютоновское поведение течения, эффективная вязкость их не зависела от скорости сдвига. При концентрации белка, превышающей данные значения, поведение течения стало более зависимым от скорости сдвига. После термической обработки эмульсий, стабилизированных МП, практически не наблюдалось изменений в гранулометрическом составе вплоть до концентрации белка 10 %. При массовой доле белка 12% происходило образование второго пика в области более крупных частиц. Образование дополнительного пика в большем диапазоне размеров частиц свидетельствуют о формировании крупных агрегатов, сопровождающих гелеобразование. В эмульсиях, стабилизированных КСБ, большая часть белка находилась в водной фазе, а МП в осадочной. Эта тенденция сохранялась по мере увеличения общей концентрации белка в эмульсии. Такое перераспределение белка характерно для эмульсий Пикеринга и способствует их повышенной стабильности. Таким образом, микропартикулят сывороточных белков характеризуется выраженными преимуществами для стабилизации пищевых эмульсий.

Ключевые слова: эмульсия Пикеринга, концентрат сывороточных белков, микропартикулят, термостабильность, устойчивость эмульсий.

The effect of whey protein microparticulates on the stabilization of food emulsions

Natalya N. Antonova [1] soknat29@yandex.ru 0000-0002-9177-695X
Ekaterina B. Stanislavskaya [1] tereshkova-katia@ya.ru 0000-0002-3474-2534
Elena I. Melnikova [1] melnikova@molvest.ru 0000-0002-0955-6238

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. Whey protein concentrates (WPCs) have significant potential for use in emulsion product formulations. Low thermal stability is a limiting factor for their use. This problem can be solved using Pickering emulsions stabilized by particles of a modified form of whey proteins – microparticulates (MPs). The aim of this study was to investigate the effect of MPs on the thermal stability of food emulsions. Standard research methods were used. The use of WPCs stabilized the emulsion at a protein content of 2%. However, at 4% protein, the emulsions readily coagulated. The period of thermal stability of the emulsion with MPs at a protein content of 2% was relatively short. With an increase in protein concentration to 4%, a significant increase in thermal stability was observed. Thermostatically treated emulsions prepared using MP at protein concentrations up to 12% and WPC at concentrations up to 4% exhibited Newtonian flow behavior, with their effective viscosity independent of shear rate. At protein concentrations above these values, flow behavior became more dependent on shear rate. After thermal treatment of MP-stabilized emulsions, virtually no changes in particle size distribution were observed up to a protein concentration of 10%. At a protein mass fraction of 12%, a second peak formed in the region of larger particles. The formation of an additional peak over a wider range of particle sizes indicates the formation of large aggregates accompanying gelation. In WPC-stabilized emulsions, most of the protein was in the aqueous phase, while MP was in the sedimentary phase. This trend persisted as the total protein concentration in the emulsion increased. This protein redistribution is characteristic of Pickering emulsions and contributes to their increased stability. Thus, whey protein microparticles are characterized by pronounced advantages for the stabilization of food emulsions.

Keywords: Pickering emulsion, whey protein concentrate, microparticle, thermal stability, emulsion stability.

Для цитирования
Антонова Н.Н., Станиславская Е.Б., Мельникова Е.И. Влияние микропартикулята сывороточных белков на стабилизацию пищевых эмульсий // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 3. С. 252–259. doi:10.20914/2310-1202-2026-3-252-259

For citation
Antonova N.N., Stanislavskaya E.B. Melnikova E.I., The effect of whey protein microparticulates on the stabilization of food emulsions. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 3. pp. 252–259. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-3-252-259

© 2026, Антонова Н.Н. и др. / Antonova N.N. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Важную роль в стабилизации эмульсий и улучшении их органолеп-тических и реологических свойств играют эмульгаторы. Белковые эмульгаторы благодаря амфифильной природе широко используется в рецептурах пищевых продуктов на эмульсионной основе [1–3]. Адсорбируясь на поверхности капель масла, белки образуют вокруг них защитные мембраны, снижают межфазное натяжение и препятствуют разрушению эмульсии [4–6].

Концентраты сывороточных белков характеризуются значительным потенциалом для использования в рецептурах эмульсионных продуктов. Они не только способны стабилизировать эмульсии, но и повышают пищевую и биологическую ценность готового продукта, а также придают ему функциональные свойства [7–10]. Однако, низкая термическая стойкость сывороточных белков является ограничивающим фактором для их применения [11]. Тепловая обработка продуктов на эмульсионной основе, стабилизированных сывороточными белками, приводит к разворачиванию белковой молекул и высвобождению активных групп, находящихся внутри глобулы [12]. Эти группы усиливают притяжение между белками, изменяя восприимчивость эмульсий к флокуляции и коалесценции [13]. Проблема термической стойкости потенциально может быть решена с помощью образования эмульсий Пикеринга, стабилизируемых частицами модифицированной формы сывороточных белков – микропартикулятом. Микропартикуляты сывороточных белков получают путем термомеханической обработки концентратов, что приводит к формированию устойчивых микрочастиц округлой формы, напоминающих жировые шарики [14–16]. Такая структура придает микропартикуляту не только сливочную консистенцию, но и термостабильность [17].

Цель работы – исследование влияния микропартикулята сывороточных белков на устойчивость пищевых эмульсий к нагреванию.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования рассматривали эмульсии, приготовленные на основе подсолнечного масла и стабилизированные стандартным и микропартикулированным сывороточным белком. Концентрат (КСБ) и микропартикулят (МП) сывороточных белков были получены в условиях филиала ПАО Молочный комбинат «Воронежский» Калачеевский сырзавод.

Приготовление эмульсий начинали с восстановления порошков КСБ и МП до массовой доли белка от 2 до 14% дистиллированной водой при 40 °С в течение 40 мин при непрерывном перемешивании. В полученные белковые растворы добавляли подсолнечное масло так, чтобы его массовая доля в эмульсии составляла 10%. Смесь нагревали до 60 °С и смешивали с помощью блендера в течение 2 мин. Далее смесь диспергировали с помощью цифрового лабораторного гомогенизатора HG-15D-Set-A.

В работе использовались современные методы исследования [18]. Массовую долю влаги КСБ и МП определяли гравиметрическим методом, белка – методом Кьельдаля, жира – кислотным методом Гербера, минеральных веществ – весовым методом после озоления пробы продукта при (550 ± 25) °С. Для определения массовой доли белка в жировой, водной и осадочной фазе эмульсий их подвергали центрифугированию при центробежном ускорении 45 000×g в течение 40 мин при 20 °С. После разделения эмульсии содержание белка в водной фазе и осадке анализировали отдельно с использованием метода Кьельдаля. Массовую долю белка в жировой фазе (адсорбированный белок) определяли как разность между общим белком эмульсии и массовой долей белка в водной и осадочной фазах. Вязкость эмульсий измеряли на ротационном вискозиметре Brookfield RVDV-II + Pro. Для оценки термоустойчивости фиксировали продолжительность выдержки эмульсии при 140 °С до выпадения хлопьев белка. Гранулометрический состав частиц объектов исследования определяли с помощью лазерного дифракционного анализатора Beckman Coulter.

Математическую обработку эксперимента проводили методами математической статистики по данным 3 опытов. Значения исследуемых показателей представляли как средние ± стандартное отклонение.

Результаты

Исследовали белковые компоненты, использованные для приготовления эмульсий, макрокомпонентный состав КСБ и МП не отличался (таблица 1).

Результаты исследования термоустойчивости эмульсий представлены в таблице 2. Молекулы сывороточных белков достаточно быстро разворачиваются при нагревании и перестраиваются на границе раздела фаз масло-вода, образуя межфазный поверхностный слой.

Таблица 1.
Состав концентрата и микропартикулята сывороточных белков

Table.1
Composition of whey protein concentrate and microparticulate matter

Массовая доля | Mass fraction	Значение, % Value, %
Влага | Moisture	4,0 ± 0,8
Жир | Fat	4,5 ± 0,5
Белок | Protein	79,8 ± 0,8
Белок в пересчете на СВ Protein in terms of DM	83,2 ± 0,6
Лактоза | Lactose	9,0 ± 0,2
Минеральные в-ва | Mineral substances	2,5 ± 0,1

Таблица.2
Термостабильность эмульсий, приготовленных с КСБ и МП при 140 °С

Table.2
Thermal stability of emulsions prepared with WPC and MP at 140 °C

Массовая доля белка в эмульсии, % Mass fraction of protein in the emulsion, %	Термостабильность эмульсий, мин Thermal stability of emulsions, min	
	с КСБ with WPC	с МП with MP
2	11,9 ± 0,5	2,3 ± 0,1
4	1,1 ± 0,1	32,4 ± 1,9
6	0,7	14,8 ± 0,3
8	мгновенная коагуляция	5,2 ± 0,2
10		2,0 ± 0,1
12		1,4 ± 0,1

Применение КСБ стабилизировало эмульсию уже при массовой доле белка 2%. Однако, при 4% белка эмульсии легко коагулировали в течение 1 минуты. Пересыщение белком жировой фазы приводило к межкапельному взаимодействию и агрегации.

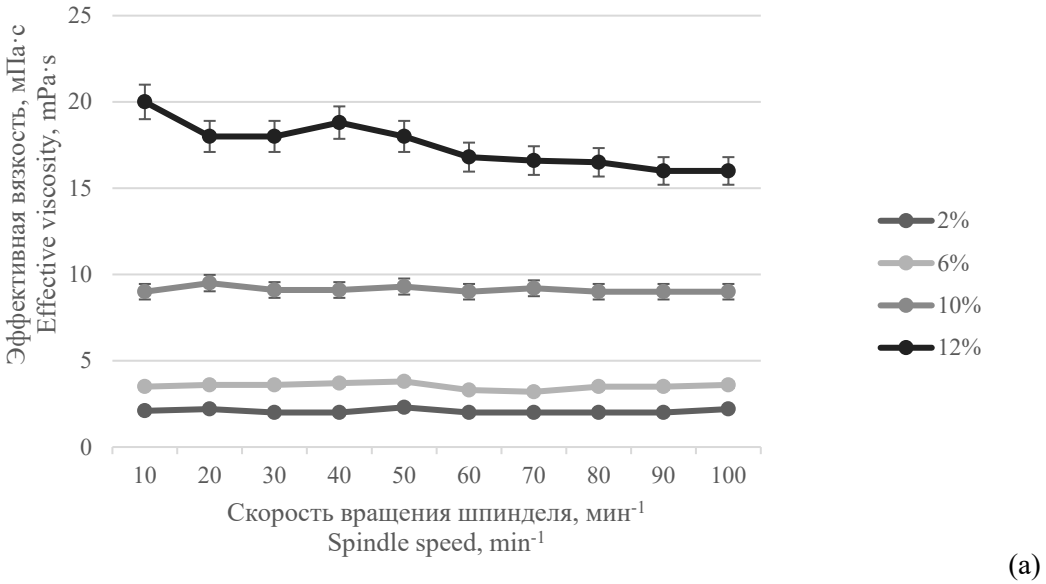
Продолжительность периода термостабильности эмульсии с МП при массовой доле белка 2% было коротким относительно эмульсии с КСБ. В отличие от КСБ частицы микропартикулята имеют больший размер и значительно меньшее количество свободных групп, способных взаимодействовать с каплями жира. Поэтому в системе, по-видимому, происходила «мостиковая» флокуляция. Из-за неполного покрытия поверхности капель микрочастицами, они присоединялись одновременно к нескольким каплям масла, образуя агрегаты [19]. При увеличении концентрации белка до 4% наблюдалось существенное повышение термостабильности. Концентрации белка выше 2% было достаточно для обеспечения полного покрытия межфазной границы, что приводило к стабилизации эмульсии.

Для более детального изучения термоустойчивости эмульсий, стабилизированных сывороточными белками, оценивали их реологические свойства после нагревания в более мягких условиях (100 ºС). При массовой доле белка 4% наблюдали изменение характера течения эмульсии, приготовленной с использованием КСБ, в то время как для МП подобные изменения происходили при массовой доле белка 12% (рисунок 1).

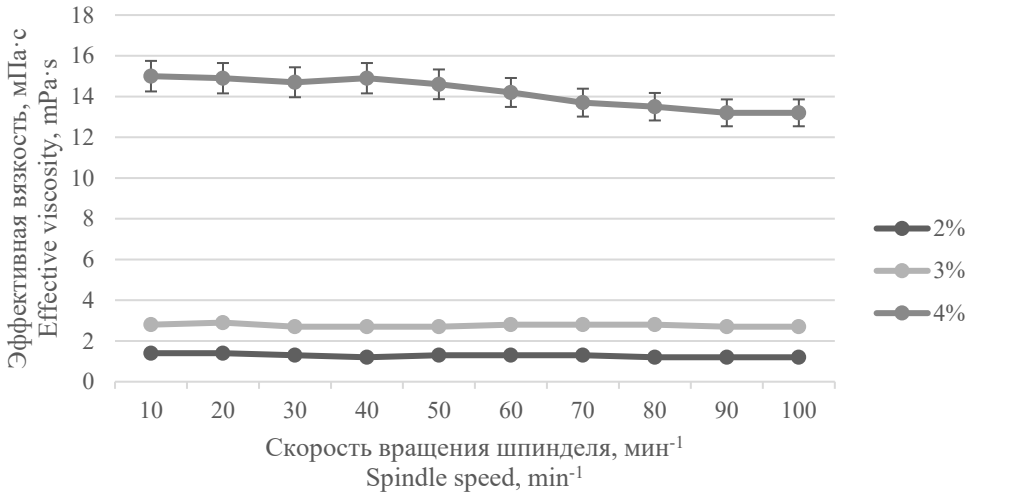
Термостатированные эмульсии, приготовленные с использованием МП, до концентрации белка 12% и КСБ до 4% характеризовались ньютоновским поведением течения, эффективная вязкость их не зависела от скорости сдвига. При концентрации белка, превышающей данные значения, поведение течения стало более зависимым от скорости сдвига. Такое изменение реологических свойств эмульсий обусловлено, по-видимому, их флокуляцией. При приложении начальной внешней силы к системе хлопья или агрегаты оказывают большее сопротивление течению, чем отдельные капли. Однако, по мере увеличения скорости сдвига агрегаты деформируются и разрушаются, вызывая высвобождение захваченной непрерывной фазы.

Для исходных эмульсий с МП (рисунок 2a), не подвергнутых нагреву, размер частиц характеризовался практически мономодальным распределением при массовой доле белка 2%.

Однако, по мере увеличения доли белка распределение становилось бимодальным, с появлением вторичного пика в области больших размеров частиц. Меньшие размеры, по-видимому, представляют собой капли масла, стабилизированные частицами микропартикулята, тогда как большие размеры – агрегаты белка, которые не участвуют в поверхностном покрытии масляных капель и находятся во взвешенном состоянии в водной фазе. После термической обработки эмульсий, стабилизированных МП, практически не наблюдалось изменений в гранулометрическом составе вплоть до концентрации белка 10% (рисунок 2b). При массовой доле белка 12% наблюдалось образование второго пика в области более крупных частиц. Нагревание не только привело к расширению гранулометрического состава, но и изменило реологические свойства эмульсии. Образование дополнительного пика в большем диапазоне размеров частиц свидетельствуют о формировании крупных агрегатов, сопровождающих гелеобразование.



(a)

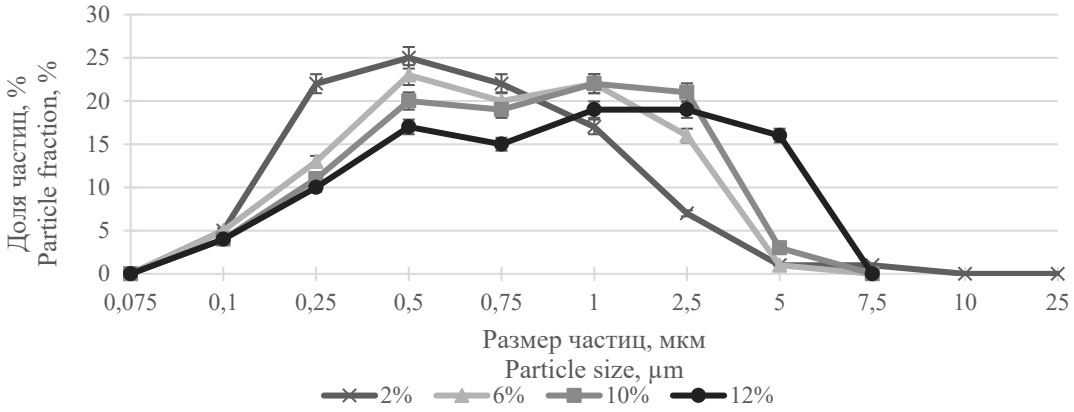


(b)

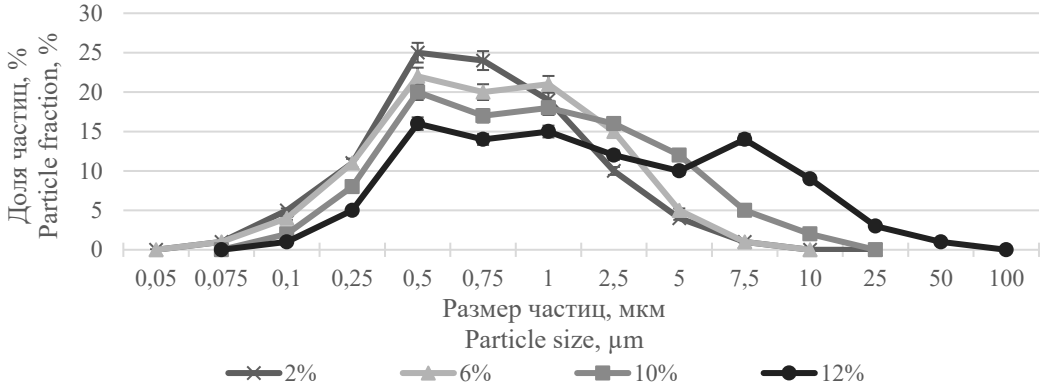
Рисунок 1. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига эмульсий, стабилизированных КСБ (a) и МП (b) при различных массовых долях белка

Figure 1. Dependence of the effective viscosity on the shear rate of emulsions stabilized by KSB (a) and MP (b) at different mass fractions of protein

Особый интерес при исследовании эмульсий, стабилизированных белком, представляет распределение белка в жировой, водной и осадочной фазах. Белок, содержащийся в жировой фазе, окружает капли жира, стабилизируя эмульсию. По достижении стадии насыщения жировой фазы белком-стабилизатором часть его переходит в водную фазу. Это вызывает увеличение силы притяжения между жировыми каплями из-за осмотического эффекта, связанного с вытеснением белка из узкой области вокруг каждой капли. По мере роста массовой доли белка увеличивается сила притяжения между частицами, что может вызвать разрушение эмульсии в результате флокуляции. Неадсорбированный белок в дисперсионной фазе эмульсии играет важную роль и в термоиндуцированной агрегации капель масла. Неадсорбированные белки разворачиваются при нагревании и взаимодействуют, образуя крупные белковые агрегаты, в том числе с белками, находящимися в жировой фазе.



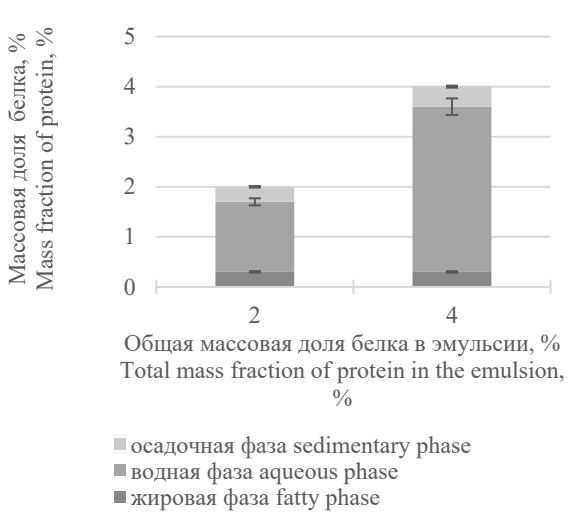
(a)



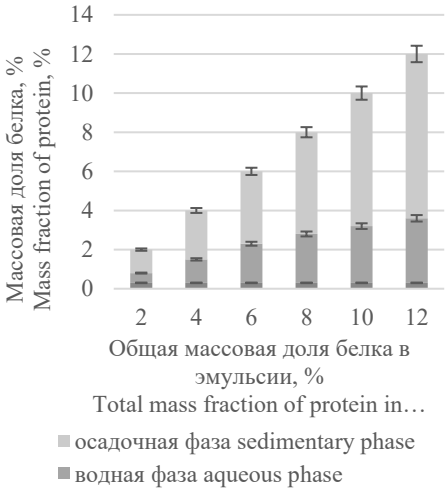
(b)

Рисунок 2. Распределение частиц по размерам в эмульсиях с МП: (a) без термической обработки и (b) с термической обработкой при различной массовой доле белка

Figure. Particle size distribution in emulsions with MP: (a) without heat treatment and (b) with heat treatment at different mass fractions of protein



(a)



(b)

Рисунок 3. Изменения концентрации белка в жировой, водной и осадочной фазах эмульсий, приготовленных с использованием КСБ (a) и МП (b)

Figure 3. Changes in protein concentration in the fat, water and sediment phases of emulsions prepared using WBC (a) and MP (b)

В эмульсиях, стабилизированных КСБ, большая часть белка находилась в водной фазе (рисунок 3a).

Увеличение общей концентрации белка приводило к повышению его массовой доли в водной фазе и небольшому в осадочной. При общей массовой доле 4% около 82% белка находилось в водной фазе, тогда как 10% и 8% – в осадочной и жировой фазах, соответственно. В эмульсиях, стабилизированных МП, напротив, большая часть белка находилась в осадочной фазе (рисунок 3b), только около 25% было обнаружено в водной фазе. Эта тенденция сохранялась по мере увеличения общей концентрации белка в эмульсии. Такое перераспределение белка характерно для эмульсий Пикеринга и способствует их повышенной стабильности. Высокая термоустойчивость эмульсий с МП объясняется образованием твердых устойчивых белковых частиц еще в процессе микропартикуляции. Они хуже растворяются в водной фазе, чем неденатурированные белки КСБ. Агрегация в эмульсиях, стабилизированных МП, происходила при массовой доле белка более 12%, что соответствовало содержанию белка в водной фазе на уровне 3,3%. Гелеобразование эмульсий, стабилизированных стандартным КСБ, происходило при такой же концентрация белка в водной фазе.

При достижении пороговой концентрации белка в эмульсии, стабилизированной МП, в процессе термообработки доля его в жировой и водной фазах уменьшалось, а в осадочной увеличивалась (рисунок 4).

Часть белка, адсорбированного на поверхности масляных капель, а также находящегося в растворенном виде в водной фазе, агрегировала во время нагревания и перемещалась в осадочную фазу. Согласно [20], денатурированный сывороточный белок характеризуется меньшей активностью и конкурирует менее эффективно за поверхность масляной капли по сравнению с нативным. Белки, вытесненные из жировой фазы, взаимодействуют с неадсорбированным белком водной фазы, образуя более крупные агрегаты и, таким образом, увеличивая содержание белка в осадке.

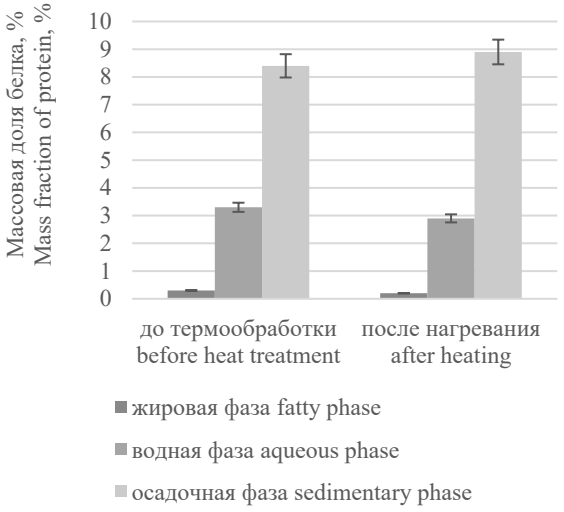


Рисунок 4. Влияние термической обработки на распределение белка в фазах эмульсии, стабилизированной МП (массовая доля общего белка 12%)

Figure 4. The effect of heat treatment on the distribution of protein in the phases of an emulsion stabilized by MP (total protein mass fraction 12%)

Заключение

В процессе получения МП происходит денатурация и агрегация белка, а последующая механическая обработка формирует мелкие устойчивые частицы. Они находятся в стабильной, неактивной конформации, т. к. после термомеханической обработки лишь небольшое количество активных групп доступно для дальнейшей агрегации. Такое свойство частиц МП позволяет ему стабилизировать эмульсии Пикеринга и повышать их устойчивость к тепловому воздействию. Микропартикулят сывороточных белков характеризуется выраженными преимуществами перед стандартным КСБ для применения в различных пищевых эмульсиях.

Литература

1 Артемова Е.Н., Власова К.В. Особенности белков муки семян тыквы различных сортов как эмульгаторов // Вестник Камчатского ГТУ. 2022. № 60. С. 6–17. doi: 10.17217/2079-0333-2022-60-6-17

2 Ma S., Ye A., Singh H., Acevedo-Fani A. Emulsifying properties of hemp and whey protein complexes achieved by microparticulation // Food Hydrocolloids. 2026. V. 171. P. 111833. doi: 10.1016/j.foodhyd.2025.111833

3 Aloo S.O., Mwiti G., Ngugi L.W., Oh D.H. Uncovering the secrets of industrial hemp in food and nutrition: The trends, challenges, and new-age perspectives // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024. V. 64. № 15. P. 5093–5112. doi: 10.1080/10408398.2022.2149468

4 Письменный С.А., Варивода А.А. Разработка технологии эмульсионных продуктов с белково-углеводной композицией // Ползуновский вестник. 2022. № 1. С. 15–22. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.002

5 Потороко И.Ю., Паймулина А.В. Биоактивность эмульсий Пикеринга в пищевой матрице: теория и практика // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2023. Т. 11. № 1. С. 35–45. doi: 10.14529/food230104

6 Потороко И.Ю., Паймулина А.В., Кади А.М.Я. Перспективы применения эмульсий пикеринга в пищевых системах // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2022. Т. 10. № 1. С. 15–22. doi: 10.14529/food220102

7 Zhao C., Chen N., Ashaolu T.J. Whey proteins and peptides in health-promoting functions – A review // International Dairy Journal. 2022. V. 126. P. 105269. doi: 10.1016/j.idairyj.2021.105269

8 Sutantawong S., Kim B.J., Kuhfeld R.F. et al. Release of bioactive peptides from whey proteins across digestion in adult humans and a static in vitro digestion model // Journal of Functional Foods. 2024. V. 122. P. 106540. doi: 10.1016/j.jff.2024.106540

9 Giglio B.M., Lobo P.C.B., Pimentel G.D. Effects of whey protein supplementation on adiposity, body weight, and glycemic parameters: A synthesis of evidence // Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases. 2023. V. 33. № 2. P. 258–274. doi: 10.1016/j.numecd.2022.09.014

10 Munkh-Gantumur A., Sukhbaatar N., Jiang Q. et al. Effect of modified fermented whey protein fortification on the functional, physical, microstructural, and sensory properties of low-fat yogurt // Food Control. 2024. V. 155. P. 110032. doi: 10.1016/j.foodcont.2023.110032

11 Triani R., Foegeding E.A. Heat stability of whey protein ingredients based on state diagrams // International Dairy Journal. 2019. V. 91. P. 25–35. doi: 10.1016/j.idairyj.2018.12.006

12 Гунькова П.И., Горбатова К.К. Биотехнологические свойства белков молока. СПб.: ГИОРД, 2015. 216 с.

13 Dybowska B.E. Whey protein-stabilized emulsion properties in relation to thermal modification of the continuous phase // Journal of Food Engineering. 2011. V. 104. № 1. P. 81–88. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.11.030

14 Мельникова Е.И., Станиславская Е.Б. Применение микропартикулята сывороточных белков в технологии полутвердых сыров // Хранение и переработка сельхозсырья. 2019. № 4. С. 129–140. doi: 10.36107/spfp.2019.199

15 Grossmann L., Beicht M., Reichert C., Weiss J. Foaming properties of heat-aggregated microparticles from whey proteins // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2019. V. 579. P. 123572. doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.06.037

16 Torres I.C., Amigo J.M., Knudsen J.C. et al. Rheology and microstructure of low-fat yoghurt produced with whey protein microparticles as fat replacer // International Dairy Journal. 2018. V. 81. P. 62–71. doi: 10.1016/j.idairyj.2018.01.004

17 Мельникова Е.И., Станиславская Е.Б., Шабалова Е.Д. Функционально-технологические свойства термостабильного концентрата сывороточных белков // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 2 (92). С. 52–56. doi: 10.20914/2310-1202-2022-2-52-56

18 Крусь Г.Н., Шалыгина А.М., Волокитина З.В. Методы исследования молока и молочных продуктов. М., 2000. 368 с.

19 Ortiz D.G., Pochat-Bohatier C., Cambedouzou J. et al. Current trends in Pickering emulsions: particle morphology and applications // Engineering. 2020. V. 6. № 4. P. 468–482. doi: 10.1016/j.eng.2019.08.017

20 Millqvist-Fureby A., Elofsson U., Bergenståhl B. Surface composition of spray-dried milk protein-stabilised emulsions in relation to pre-heat treatment of proteins // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2001. V. 21. № 1–3. P. 47–58. doi: 10.1016/S0927-7765(01)00183-7

References

1 Artemova E.N., Vlasova K.V. Features of proteins of pumpkin seed flour of various varieties as emulsifiers. Bulletin of Kamchatka State Technical University. 2022. no. 60. pp. 6–17. doi: 10.17217/2079-0333-2022-60-6-17 (in Russian).

2 Ma S., Ye A., Singh H., Acevedo-Fani A. Emulsifying properties of hemp and whey protein complexes achieved by microparticulation. Food Hydrocolloids. 2026. vol. 171. article 111833. doi: 10.1016/j.foodhyd.2025.111833.

3 Aloo S.O., Mwiti G., Ngugi L.W., Oh D.H. Uncovering the secrets of industrial hemp in food and nutrition: The trends, challenges, and new-age perspectives. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024. vol. 64. no. 15. pp. 5093–5112. doi: 10.1080/10408398.2022.2149468.

4 Pismenny S.A., Varivoda A.A. Development of technology for emulsion products with a protein-carbohydrate composition. Polzunovsky Bulletin. 2022. no. 1. pp. 15–22. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.002 (in Russian).

5 Potoroko I.Yu., Paymulina A.V. Bioactivity of Pickering emulsions in a food matrix: theory and practice. Bulletin of SUSU. Series: Food and Biotechnology. 2023. vol. 11. no. 1. pp. 35–45. doi: 10.14529/food230104 (in Russian).

6 Potoroko I.Yu., Paymulina A.V., Kadi A.M.Ya. Prospects for the use of Pickering emulsions in food systems. Bulletin of SUSU. Series: Food and Biotechnology. 2022. vol. 10. no. 1. pp. 15–22. doi: 10.14529/food220102 (in Russian).

7 Zhao C., Chen N., Ashaolu T.J. Whey proteins and peptides in health-promoting functions – A review. International Dairy Journal. 2022. vol. 126. article 105269. doi: 10.1016/j.idairyj.2021.105269.

8 Sutantawong S., Kim B.J., Kuhfeld R.F. et al. Release of bioactive peptides from whey proteins across digestion in adult humans and a static in vitro digestion model. Journal of Functional Foods. 2024. vol. 122. article 106540. doi: 10.1016/j.jff.2024.106540.

9 Giglio B.M., Lobo P.C.B., Pimentel G.D. Effects of whey protein supplementation on adiposity, body weight, and glycemic parameters: A synthesis of evidence. Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases. 2023. vol. 33. no. 2. pp. 258–274. doi: 10.1016/j.numecd.2022.09.014.

10 Munkh-Gantumur A., Sukhbaatar N., Jiang Q. et al. Effect of modified fermented whey protein fortification on the functional, physical, microstructural, and sensory properties of low-fat yogurt. Food Control. 2024. vol. 155. article 110032. doi: 10.1016/j.foodcont.2023.110032.

11 Triani R., Foegeding E.A. Heat stability of whey protein ingredients based on state diagrams. International Dairy Journal. 2019. vol. 91. pp. 25–35. doi: 10.1016/j.idairyj.2018.12.006.

12 Gunkova P.I., Gorbatova K.K. Biotechnological properties of milk proteins. Saint Petersburg: GIORD, 2015. 216 p. (in Russian).

13 Dybowska B.E. Whey protein-stabilized emulsion properties in relation to thermal modification of the continuous phase. Journal of Food Engineering. 2011. vol. 104. no. 1. pp. 81–88. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.11.030.

14 Melnikova E.I., Stanislavskaya E.B. Application of whey protein microparticulate in the technology of semi-hard cheeses. Storage and Processing of Agricultural Raw Materials. 2019. no. 4. pp. 129–140. doi: 10.36107/spfp.2019.199 (in Russian).

15 Grossmann L., Beicht M., Reichert C., Weiss J. Foaming properties of heat-aggregated microparticles from whey proteins. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2019. vol. 579. article 123572. doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.06.037.

16 Torres I.C., Amigo J.M., Knudsen J.C. et al. Rheology and microstructure of low-fat yoghurt produced with whey protein microparticles as fat replacer. International Dairy Journal. 2018. vol. 81. pp. 62–71. doi: 10.1016/j.idairyj.2018.01.004.

17 Melnikova E.I., Stanislavskaya E.B., Shabalova E.D. Functional and technological properties of a thermostable whey protein concentrate. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2022. vol. 84. no. 2 (92). pp. 52–56. doi: 10.20914/2310-1202-2022-2-52-56 (in Russian).

18 Krus G.N., Shalygina A.M., Volokitina Z.V. Methods of research of milk and dairy products. Moscow, 2000. 368 p. (in Russian).

19 Ortiz D.G., Pochat-Bohatier C., Cambedouzou J. et al. Current trends in Pickering emulsions: particle morphology and applications. Engineering. 2020. vol. 6. no. 4. pp. 468–482. doi: 10.1016/j.eng.2019.08.017.

20 Millqvist-Fureby A., Elofsson U., Bergenståhl B. Surface composition of spray-dried milk protein-stabilised emulsions in relation to pre-heat treatment of proteins. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2001. vol. 21. no. 1–3. pp. 47–58. doi: 10.1016/S0927-7765(01)00183-7.

Сведения об авторах

Наталья Н. Антонова аспирант, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, soknat29@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-9177-695X

Екатерина Б. Станиславская д.т.н., профессор, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, tereshkova-katia@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-3474-2534

Елена И. Мельникова д.т.н., профессор, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, melnikova@molvest.ru
https://orcid.org/0000-0002-0955-6238

Information about authors

Natalya N. Antonova graduate student, Department of Technology of Animal Products, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, soknat29@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-9177-695X

Ekaterina B. Stanislavskaya Doctor of Technical Sciences, professor, Department of Technology of Animal Products, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, tereshkova-katia@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-3474-2534

Elena I. Melnikova Doctor of Technical Sciences, professor, Department of Technology of Animal Products, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, melnikova@molvest.ru
https://orcid.org/0000-0002-0955-6238

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 20/07/2026 **После редакции** 29/07/2026 **Принята в печать** 24/08/2026

Received 20/07/2026 **Accepted in revised** 29/07/2026 **Accepted** 24/08/2026