

Пенообразующие свойства концентрата белков обезжиренного молока

С. А. Иванова 

Дата поступления в редакцию: 18.09.2018
Дата принятия в печать: 28.12.2018

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»,
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6

e-mail: pavvm2000@mail.ru



© С. А. Иванова, 2018

Аннотация. Аэрированные продукты пользуются популярностью во всем мире. Они широко представлены в ассортименте глобального продовольственного рынка, в том числе и в Российской Федерации. Особо любимы среди них молочные продукты с пенной структурой. Молочные белки традиционно добавляются для стабилизации различных пищевых продуктов, в том числе и с пенной структурой. Работа посвящена исследованию влияния изменения концентрации белков обезжиренного молока на пенообразующие свойства концентратов. Изучена зависимость различных концентраций белков (от 3,4 до 16,0 %) восстановленного обезжиренного молока (9,2 %) и пенообразующих свойств молочно-белковых концентратов, полученных ультрафильтрацией. Количественно оценена возможность их практического применения в качестве основы аэрированных продуктов. Качество готовой пены оценивали по пенообразующим характеристикам и устойчивости пены. Распределение пузырьков белковой пены по размерам моделировали с использованием распределения Эрланга. По моделированию более устойчивыми являлись пены белковых растворов с концентрацией от 12 %. Концентраты с самым высоким содержанием белка (16 %) имели не только большую вспениваемость, но и большую стабилизирующую характеристику. Плотность белковых образцов также увеличивалась с увеличением концентрации белков. Характеристики пенообразования белковых растворов (кратность и плотность полученной пены) увеличивались с увеличением концентрации белков. Стабильность пенной структуры оценивали по времени полураспада пенного объема и среднему диаметру пузырьков пены белковых растворов. Наиболее стабильными были пены с наибольшим содержанием белков в концентрате. Концентраты белков из восстановленного обезжиренного молока уступают в пенообразующих характеристиках концентратам из молока, не подверженного сушке. Тем не менее, полученные результаты позволяют утверждать, что восстановленное обезжиренное молоко и концентраты его белков идеально подходят для производства аэрированных молочных продуктов, поскольку обеспечивают им как хорошую вспениваемость, так и стабильность.

Ключевые слова. Молочная пена, белковый концентрат, обезжиренное молоко, устойчивость

Для цитирования: Иванова, С. А. Пенообразующие свойства концентрата белков обезжиренного молока / С. А. Иванова // Техника и технология пищевых производств. – 2018. – Т. 48, № 4. – С. 12–21. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-4-12-21>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/>

The Foaming Properties of Skim Milk Protein Concentrate

S.A. Ivanova 

Received: September 18, 2018
Accepted: December 28, 2018

Kemerovo State University,
6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia

e-mail: pavvm2000@mail.ru



© S.A. Ivanova, 2018

Abstract. Aerated products are popular all over the world, especially those with a foam structure. They are widely represented in the range of the global food market, including that of the Russian Federation. Traditionally, milk proteins are added to stabilize various foods. The present research explains how the concentration of skimmed milk proteins affects the foaming properties of concentrates. The experiment featured the influence of various protein concentrations (from 3.4 to 16.0%) on the foaming properties of reduced skim milk (9.2%) and of milk protein concentrates obtained by ultrafiltration. The research established their practical application for aerated products. The quality of protein foam was evaluated by foaming characteristics and foam stability. The distribution of protein foam bubbles by size was modelled using Erlang distribution. According to the simulation, the foams of protein solutions with a concentration of 12% were more stable. Concentrates with the highest protein content (16%) had not only a greater foaming, but also a greater stabilizing property. The protein samples density increased together with protein concentration. Similarly, the foaming characteristics of protein solutions (multiplicity and density of the foam) increased together with protein concentration. The stability of the foam structure was estimated by the half-life of the foam volume and the average diameter of the foam bubbles in the protein solutions. The most stable foams were those with the highest protein content in the concentrate. The protein concentrates from reduced skim milk were inferior in foaming characteristics to concentrates from milk that was not subjected to drying. However, the results suggest that the reduced skim milk and its protein concentrates are ideal for the production of aerated dairy products because they provide both good foaming and stability.

Keywords. Milk foam, protein concentrate, skim milk, stability

For citation: Ivanova S.A. The Foaming Properties of Skim Milk Protein Concentrate. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2018, vol. 48, no. 4, pp. 12–21. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-4-12-21>.

Введение

Продукты питания с пенной структурой, от коктейлей до сдобы, сохраняют свою популярность и разнообразие на продовольственном рынке. Стабилизация и сохранение структур таких продуктов в течение всего срока годности по-прежнему остается актуальной задачей, которая привлекает внимание исследователей и производителей [1–5]. Часто аэрированные пищевые продукты стабилизируются поверхностно-активными действиями протеинов в них входящих. Это могут быть белки животного (молочные, яичные, белки крови) и растительного (белковые изоляты ячменя, овса, бобовых и т.д.) происхождения [6–9].

Интенсивное перемешивание и барботаж рассматриваются как два основных механических метода пенообразования. В способах перемешивания пена образуется при механическом смешении газовой и жидкой фаз, например, при взбивании или при смешивании с мешалкой, при встряхивании сосуда, частично заполненного раствором, при одновременном потоке газа и жидкости в трубке, при заливке жидкости на поверхность того же раствора и т.д. Эти методы наиболее часто используются в количественных исследованиях пен [4]. Каким бы ни был метод вспенивания, способность данного раствора к вспениванию определяется через объем образующейся пены в заданных условиях (время вспенивания, температура, интенсивность перемешивания и т.д.) и возможностью сохранения полученной пены.

Молочные белки широко используются для стабилизации различных пищевых продуктов, в том числе и с пенной структурой [6, 10, 11]. Поэтому внимание исследователей к изучению свойств и характеристик белковой пены не ослабевает, тем самым сохраняя ее актуальность [1, 12–15].

Пенообразующие свойства молока определяются его составом, режимами пастеризации и

гомогенизации, используемым оборудованием и технологическими параметрами в процессе аэрирования [16–21]. Известны несколько факторов, влияющих на свойства пенообразования протеинов молока, – внутренние (последовательность аминокислот, молекулярная масса, гидрофобность/гидрофильность, природа поверхностного белка, гибкость белка, электрические заряды и их распределение и соотношение различных фракций белков) и внешние (рН, температура и взаимодействие с другими макромолекулами, концентрация самих белков) [4, 12, 18, 22–25]. Как правило, изучают влияние внутренних факторов и/или в сочетании с физико-химическими процессами, сопровождающими пенообразования конкретного белкового раствора молока цельного, обезжиренного, концентратов молочных белков и т.п. Пенообразующие и эмульгирующие свойства зарегистрированы у казеинатов [21, 26], мономеров казеина [27] и сывороточных белков [28], в большом разнообразии применяемых в рецептурах пищевых продуктов. Исследования характеристик пенообразования молочных белков сосредоточены на достаточно низкой концентрации белка (не более 6 %).

Целью данной работы было изучение влияния повышения концентрации белков обезжиренного молока на пенообразующие свойства концентратов, из него полученных, и на формирование стабильной структуры аэрированных продуктов на их основе.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись образцы молочно-белковых концентратов и приготовленная из них пена. Образцы молочно-белковых концентратов МБК-р (р % – содержание белка, табл. 1) были получены ультрафильтрацией в НИИ биотехнологии КемГУ. Коммерческие образцы сухого обезжиренного коровьего молока (34,0 % белка, 1,5 % жира, 52,6 % углеводов; ООО Маслосыркомбинат «Тюкалинский»,

Таблица 1 – Физико-химические характеристики восстановленного обезжиренного молока и концентрата белков из него

Table 1 – Physico-chemical characteristics of the reduced skim milk and the skim milk protein concentrate

Образец	Массовая доля сухих веществ, %	Массовая доля белка, %	Массовая доля лактозы, %	Плотность, г/см ³
№ 1	9,2 ± 0,42	3,4 ± 0,11	4,80 ± 0,01	1032 ± 0,001
№ 2	11,9 ± 0,38	6,0 ± 0,10	5,00 ± 0,00	1042 ± 0,001
№ 3	12,4 ± 0,35	6,8 ± 0,12	5,00 ± 0,01	1058 ± 0,000
№ 4	13,7 ± 0,47	7,4 ± 0,15	5,00 ± 0,00	1063 ± 0,002
№ 5	14,5 ± 0,48	8,8 ± 0,14	5,00 ± 0,00	1082 ± 0,001
№ 6	18,8 ± 0,58	12,0 ± 0,16	5,00 ± 0,00	1092 ± 0,001
№ 7	23,4 ± 0,61	16,0 ± 0,15	5,00 ± 0,00	1096 ± 0,002

№ 1 – восстановленное обезжиренное молоко; № 2 – МБК-6,0; № 3 – МБК-6,8; № 4 – МБК-7,4; № 5 – МБК-8,8; № 6 – МБК-12,0; № 7 – МБК-16,0.

No. 1 – reconstituted skimmed milk; No. 2 – milk-protein concentrate 6.0; No. 3 – milk-protein concentrate 6.8; No. 4 – milk-protein concentrate 7.4; No. 5 – milk-protein concentrate 8.8; No. 6 – milk-protein concentrate 12.0; No. 7 – milk-protein concentrate 16.0.

г. Тюкалинск, Омская область, Россия) восстанавливали в очищенной воде в соответствии с рекомендациями производителя. Перед концентрированием восстановленное обезжиренное молоко сквашивали закваской молочнокислых бактерий в количестве $6 \pm 1\%$ в течение 11 ± 1 ч до pH $4,6 \pm 0,1$. Закваску лиофилизированных культур прямого внесения EZAL U-D MYE 96 (состоит из *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacterium del-brueckii* spb. *Bulgaricus*) готовили в соответствии с инструкцией производителя. Концентрацию белков обезжиренного молока проводили на ультрафильтрационной установке МФУ-Р-45-300 (Россия) при температуре 50 ± 5 °С, скорости движения молочнокислого сгустка $2,0 \times 10^{-2}$ м/с, рабочее давление 0,6 МПа, удельная производительность составила $1,178 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \times \text{ч})$.

Образцы молочной пены получали вспениванием обезжиренного молока и молочно-белковых концентратов из нее роторно-пульсационной установкой ГИД-100/1 (ВНИМИ, Россия) в течение 3 мин при скорости вращения ротора 2500 об/мин, коэффициенте заполнения рабочей камеры – 0,3, величине зазора между ротором и статором не более 0,1 мм, температура обрабатываемого раствора – 24 ± 2 °С [11, 15, 29–31].

Применяли общепринятые органолептические, химические и физические методы исследования. Физико-химические показатели (массовые доли) определяли по стандартным методикам: общее содержание белка (в зависимости от вида продукта) определяли по ГОСТ 25179-90, ГОСТ 23327-98 рефрактометрически и методом формульного титрования в качестве арбитражного использовали полумикрометод Кьельдаля. Фракционирование азотистых веществ, а также изучение их состава и свойств проводили по известным методикам [32–35]. Массовую долю сухих веществ определяли методом высушивания с песком по ГОСТ 3626-73. Плотность молока и молочного сырья определяли по ГОСТ 3625-84. Температуру молочного сырья определяли по ГОСТ 26754-85.

Активную кислотность определяли электрометрически на pH-метр Sevev Compact (Mettler Toledo, США) по рекомендациям производителя, титруемую кислотность определяли по ГОСТ 3624-92 (8764-92). Метод основан на нейтрализации кислот и их солей раствором едкой щелочи в присутствии индикатора фенолфталеина [36].

Плотность пены на молочной основе вычисляли по формуле:

$$\rho_n = \rho_p (1 - \varphi), \quad (1)$$

где ρ_p – плотность вспениваемого раствора,
 ρ_n – плотность пены,
 φ – объемная доля воздушной фазы:

$$\varphi = (\rho_p - \rho_n) / \rho_p. \quad (2)$$

Кратность пены определяли по формуле:

$$K = (\rho_n / \rho_p) 100\%. \quad (3)$$

Устойчивость пены определяли по продолжительности времени до разрушения всего объема пены [37–39].

Стабильность пены оценивали по способности сохранять пенную структуру, поддерживать свой объем в течение определенного периода времени до полного разрушения:

$$FS = (V_0 / V_i) 100\%, \quad (4)$$

где V_0 – объем пены сразу после процесса взбивания,

V_i – объем пены через t_i мин после формирования пены.

Для описания распределения пузырьков по размерам использовали распределение Эрланга k -го порядка с непрерывным временем, под которым понимали диаметр пузырька пены, $t \in [0, +\infty)$.

Функция распределения Эрланга k -го порядка имеет вид:

$$F_k(t) = 1 - e^{-\lambda t} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}, \quad k=1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Распределение Эрланга описывает поток, который получается из простейшего просеиванием событий. Если в простейшем потоке после появления первого события учитывать только события с нечетными номерами, то получим распределение Эрланга 2 порядка. Если учитывать только каждое k -ое событие, то получаем распределение Эрланга k -го порядка.

Пусть случайная величина η – размер пузырька пены в мм, $M\eta = d_{cp}$, $\sigma\eta = \sigma$ – допустимое отклонение размера пузырька пены. Тогда $1/\lambda$ – средний диаметр пузырька, мм; число k характеризует взаимное влияние пузырьков,

$d_{cp} = M\eta = k / \lambda$, $\sigma = \sqrt{D\eta} = \sqrt{k / \lambda^2} = \sqrt{k} / \lambda$, $k=1, 2, 3, \dots$

Состояние дисперсной фазы (пузырьков газа) определяли микроскопически по изображениям свежеприготовленной пены и пены через 5 мин после приготовления. Снимки были сделаны с помощью микроскопа с системой документирования Axio Imager M2 (Carl Zeiss AG, Германия). Средние значения и стандартные отклонения размеров пузырьков определяли с помощью ПО Image-Pro Discovery (V.4.5.1.29, 2002, Media Cybernetics Inc.).

Каждый эксперимент повторяли три раза и данные выражали в виде среднего \pm стандартное отклонение. Обработка данных осуществлялась стандартными методами математической статистики. Однородность эффектов выборки проверяли с помощью t -критерия Стьюдента. Различия между средними значениями считались значимыми, когда доверительный интервал был меньше 5 % ($P \leq 0,05$).

Результаты и их обсуждение

Были измерены физические свойства восстановленного обезжиренного коровьего молока и полученных из него молочно-белковых

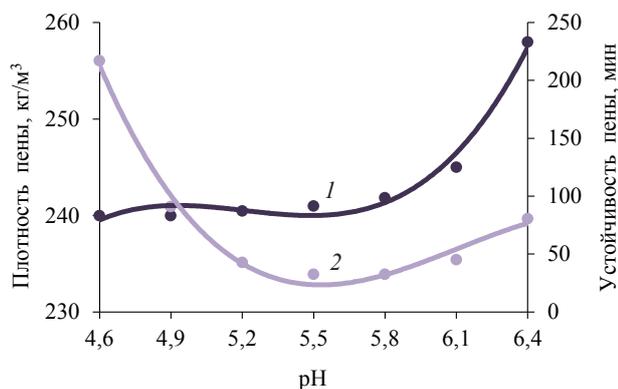


Рисунок 1 – Влияние кислотности обезжиренного молока на пенообразующие свойства молочно-белкового концентрата: 1 – плотность; 2 – устойчивость

Figure 1 – The effect of skim milk acidity on the foaming properties of milk protein concentrate: 1 – density; 2 – stability

концентратов. Плотность колебалась от 1,032 до 1,096 г/см³ (табл. 1). В целом плотность увеличивалась по мере увеличения концентрации белка. Значение pH восстановленных образцов обезжиренного молока (9,2 %) составило 6,7. Сквашенные образцы молочно-белковых концентратов имели pH 4,6. В процессе концентрирования и пенообразования pH образцов МБК изменился до 4,8–5,0.

Borcharding с соавторами [17, 23] указывали, что значение pH между 6,0 и 7,0 оказывает незначительное влияние в целом на размеры пузырьков пены обезжиренного молока и на их устойчивость к дренажу. Нами установлено [11, 29], что снижение активной кислотности с 6,4 до 4,6 (в 1,4 раза) приводит к увеличению плотности пены, полученной роторно-пульсационным устройством, приблизительно в 1,1 раза, а устойчивость пены к распаду повышается в 2,7 раза (рис. 1). Известно, что массы, содержащие белок, проявляют максимальную пенообразующую способность в изoeлектрической точке, которая соответствует pH ниже 7, а для молочных белков около 4,58–4,60. В этом аспекте молочно-белковые концентраты являются более предпочтительными в использовании для получения пенообразных масс, по сравнению с другими молочными системами, в частности – с молоком.

Поскольку свойства, в том числе и пенообразующие, белков определяются их высокомолекулярной природой и строением, то, кроме pH молока, белкового раствора и температуры, как окружающей среды, так и самого раствора, влияют на их вспениваемость (рис. 2). Изменение температуры на 10 °C способствует изменению плотности ГДС от 2 % до 52 %, устойчивости – от 3 до 76 %. Установлено [11, 29], что увеличение температуры с 4 до 34 °C приводит к уменьшению плотности ГДС до 1,5 раз и увеличению устойчивости до 2,3 раза. Более того, при температуре 14 °C пена характеризуется ячеистыми пузырьками

газа. Увеличение температуры свыше 25 °C придает дисперсной системе кремообразную, мелкодисперсную структуру. Процесс разрушения полученных образцов при различных температурах также имеет некоторые особенности: в диапазоне от 4 до 24 °C мелкие пузырьки газа соединяются, образуя крупные с размерами до 15–20 мм, затем полностью разрушаются. При более высоких температурах образующиеся крупные пузыри газа достигают размеров не больше 7–8 мм, после чего длительное время не разрушаются.

Дисперсность и размеры пузырьков белковой пены смоделировали с использованием распределения Эрланга *k*-го порядка. Обычно для этого используют распределение Пуассона, нормальное распределение, логарифмически нормальные распределения, распределения типа Вейбула и др. [40]. Однако для этого лучше выбрать то распределение, которое, с одной стороны, учитывает наличие взаимного влияние пузырьков друг на друга, а, с другой стороны, является непрерывным. Метод вложенных цепей Маркова идеально подходит, но трудно воспринимаем. Поскольку распределение пузырьков по размерам достаточно плотно, то хотелось бы иметь возможность. В ряде случаев рассмотрение вместо непрерывного аналога дискретного распределения приводит к упрощению моделей, причем далеко не всегда в ущерб качеству. Мы для реализации этой цели выбрали распределение Эрланга, а пуассоновский процесс описывает простейший поток событий, для которого время между соседними событиями является случайной величиной с экспоненциальной функцией распределения, являющейся частным случаем распределения Эрланга [29].

Преимущество применения распределения Эрланга при исследовании процесса пеногенерирования состоит в том, что можно использовать экспоненциальное распределение, т.е. распределение Эрланга 1 порядка, хотя более точным является, в нашем случае, распределение

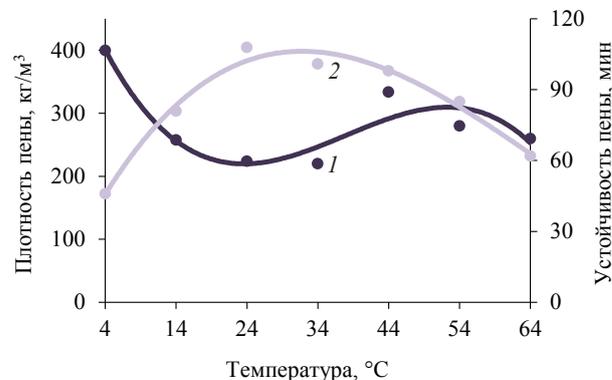


Рисунок 2 – Влияние температуры вспениваемого раствора на пенообразующие свойства молочно-белкового концентрата: 1 – плотность; 2 – устойчивость

Figure 2 – The effect of the solution temperature on the foaming properties of milk protein concentrate: 1 – density; 2 – stability

Таблица 2 – Влияние содержания белков в концентрате на дисперсность, средний пузырьков пены
 Table 2 – Effect of the protein content in the concentrate on foam dispersion, average number of foam bubbles

Образец	Относительное распределение пузырьков (%) со средним диаметром, мм				Средний диаметр, мкм d_0	d_{cp} , мм	σ
	менее 1	1–3	3–5	более 5			
№ 1	0	58	27	15	207 ± 73		
*	4,18	58,64	23,18	14,00		2,396	2,396
**	5,04	56,48	26,97	11,51		2,490	1,761
***	6,07	55,01	29,67	9,25		2,547	1,471
№ 2	28	37	25	10	136 ± 60		
*	25,72	35,97	23,18	15,13		1,421	1,421
**	27,75	37,34	22,18	12,73		1,568	1,109
***	23,08	39,76	21,08	16,08		1,687	0,974
№ 3	37	28	32	3	130 ± 58		
*	25,34	38,33	30,87	5,46		1,482	1,482
**	26,82	40,81	27,04	5,33		1,229	0,869
***	28,03	42,27	26,01	3,69		1,112	0,642
№ 4	53	32	15	0	127 ± 52		
*	49,79	37,55	9,47	3,19		1,451	1,451
**	52,88	44,02	2,96	0,14		1,129	0,798
***	53,05	45,94	1,00	0,01		1,071	0,618
№ 5	59	30	11	0	116 ± 37		
*	57,60	34,78	6,25	1,37		1,166	1,166
**	58,97	39,23	1,75	0,05		1,008	0,713
***	59,01	40,45	0,54	0,00		0,980	0,566
№ 6	88	12	0	0	103 ± 22		
*	88,00	11,83	0,17	0,00		0,572	0,572
**	88,00	11,98	0,02	0,00		0,647	0,457
***	88,00	12,00	0,00	0,00		0,693	0,400
№ 7	100	0	0	0	92 ± 11		
*	100,00	0,00	0	0		0,059	0,059
**	100,00	0,00	0	0		0,095	0,067
***	100,00	0,00	0	0		0,103	0,059

Распределение Эрланга: * – 1, ** – 2, *** – 3 порядка

Erlang distribution: * first degree, ** second degree, *** third degree

Эрланга 3 порядка. Это позволяет построить ряд математических моделей, представленных в виде систем дифференциальных уравнений, которые дают возможность получить аналитическое решение и при этом можно оценить погрешность, возникающую за счет пренебрежения взаимным влиянием пузырьков. Кроме того, распределение Эрланга оказывается достаточно устойчивым, относительно изменения начальных условий, его определяющих.

Полученные результаты приведены в таблице 2. В зависимости от использованного сырья и концентрации белков в нем лучше описывало распределение пузырьков по размерам распределения Эрланга 2 или 3 порядка.

Если в качестве критерия устойчивости пены используется средний диаметр ее пузырьков, не превосходящий 1 мм и имеющий наименьший разброс в образце, то распределение Эрланга 3 порядка рекомендует рассматривать в качестве основы белковых пен молочно-белковые концентраты обезжиренного молока с концентрацией не ниже 12 %. Полученные диапазоны наиболее вероятных размеров пузырьков пены для образцов № 1–7 в мм

следующие: 1,076–3,623, 0,713–2,400, 0,470–1,582, 0,453–1,524, 0,414–1,394, 0,293–0,986 и 0,044–0,147. Условиям устойчивости удовлетворяют образцы № 6 и № 7 с диапазонами значений 0,293–0,986 и 0,044–0,147.

Характеристики пенообразования образцов молочно-белковых концентратов приведены в таблице 3. Увеличение кратности происходило с увеличением содержания сухих веществ в образцах молочно-белковых концентратов с увеличением концентрации белков. Наблюдалась значительная разница (от 4 до 46 %) между вспенивающими характеристиками восстановленного обезжиренного молока и молочно-белковых концентратов из него полученного. Кратность пены составила от 285 до 417 %. В нашем исследовании самую высокую кратность имела пена из молочно-белкового концентрата с содержанием белка 16,0 %. Авторы [4] сообщали, что пенообразующая способность увеличивалась с возрастанием концентрации молочного белка до достижения предельного значения, после которого стабилизировалась. Наблюдается отличие пенообразующих характеристик в зависимости от соотношения молочных белков (казеин/

Таблица 3 – Пенообразующие характеристики молочно-белковых концентратов обезжиренного молока

Table 3 – The foaming characteristics of the skim milk protein concentrates

Образец	Кратность пены, %	Плотность пены, г/см ³	Устойчивость пены, мин	Средний диаметр пузырька, мкм	
				d ₀	d ₅
№ 1	285 ± 32	322 ± 0,01	65 ± 3	207 ± 73	319 ± 87
№ 2	297 ± 23	308 ± 0,01	67 ± 5	136 ± 60	181 ± 66
№ 3	303 ± 20	281 ± 0,00	72 ± 4	130 ± 58	171 ± 63
№ 4	322 ± 19	267 ± 0,01	74 ± 3	127 ± 52	163 ± 61
№ 5	334 ± 21	254 ± 0,00	82 ± 5	116 ± 37	147 ± 42
№ 6	356 ± 32	228 ± 0,00	87 ± 4	103 ± 22	144 ± 39
№ 7	417 ± 14	220 ± 0,01	110 ± 3	92 ± 11	136 ± 29

№ 1 – восстановленное обезжиренное молоко; № 2 – МБК-6,0; № 3 – МБК-6,8; № 4 – МБК-7,4; № 5 – МБК-8,8; № 6 – МБК-12,0; № 7 – МБК-16,0.

No. 1 – reconstituted skimmed milk; No. 2 – milk-protein concentrate 6.0; No. 3 – milk-protein concentrate 6.8; No. 4 – milk-protein concentrate 7.4; No. 5 – milk-protein concentrate 8.8; No. 6 – milk-protein concentrate 12.0; No. 7 – milk-protein concentrate 16.0.

сывороточные белки). Казеин придавал большие, чем сывороточные белки, пенообразующие свойства растворов восстановленного обезжиренного молока с добавлением молочных белков. В работе [12] вспениваемость белковых растворов с казеином достигала 1422 %, с сывороточными белками – до 534 %. Объясняли лучшие вспенивающие характеристики казеина поверхностно-активными свойствами и низкой адсорбцией белков молока на поверхности раздела фаз воздух-раствор и приводя ссылки на аналогичные результаты других авторов [41, 42].

Плотность пены исследуемых образцов (табл. 3) принимала значения от 322 до 220 г/см³. С увеличением содержания белков плотность пены уменьшалась. Авторам [17, 23] удалось получить пену из сконцентрированного обезжиренного молока ультрафильтрацией (6 % белка) с меньшей плотностью (от 110 до 220 г/см³). По-видимому, восстановленное обезжиренное молоко в процессе сушки теряет пенообразующие характеристики из-за меняющихся свойств белков молока. Авторы [12] получили пену плотностью от 69 до 179 г/см³ внесением в восстановленное обезжиренное молоко концентратов молочных белков (казеина и/или сывороточных). Большие пенообразующие свойства белковому раствору придавал казеин, рассмотренные концентрации приводили к увеличению пенообразования без достижения стабилизации.

Устойчивость пены оценивали по времени полного разрушения и по среднему размеру ее пузырьков (табл. 3). Диаметр пены определяли сразу после пенообразования и через 5 минут после. Увеличение концентрации белка привело к уменьшению начального среднего диаметра пузырьков от 207 до 102 мкм в образцах растворов молочных белков обезжиренного молока. Аналогичные результаты приведены в работах [4, 17], где начальный средний диаметр пузырьков обезжиренного молока восстановленного или невосстановленного, а также белковых концентратов на их основе уменьшался с увеличением концентрации белка.

Средний диаметр пузырька, полученного после 5 мин образования пены, был больше начального среднего диаметра пузырька от 136 до 319 мкм, размер которых также находился в обратной зависимости от концентрации белка. У авторов [12] был получен аналогичный результат, однако, они установили, что белковые растворы с добавлением концентрата казеина имели меньшую стабильность и большую неоднородность по размерам пузырьков (около 3 %), чем в растворах с добавлением сывороточных белков.

Качество готовой белковой пены, кроме содержания газовой фазы, формы и количества пузырьков, характеризуется устойчивостью или стабильностью – временем сохранения некоторого объема пены или числа пузырьков, величина позволяющая судить о кинетических особенностях процесса старения [11]. Стабильность белковой пенной структуры изучали по сохранению начального объема пены, которую приняли за

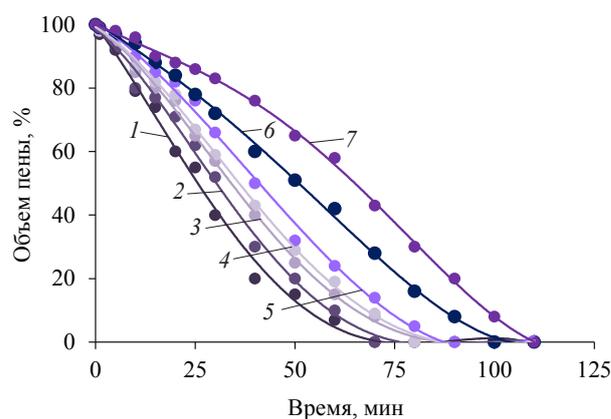


Рисунок 3 – Изменение объема белковой пены с течением времени после создания: 1 – восстановленное обезжиренное молоко; 2 – МБК-6,0; 3 – МБК-6,8; 4 – МБК-7,4; 5 – МБК-8,8; 6 – МБК-12,0; 7 – МБК-16,0.

Figure 3 – Changes of the protein foam volume in time: No. 1 – reconstituted skimmed milk; No. 2 – milk-protein concentrate 6.0; No. 3 – milk-protein concentrate 6.8; No. 4 – milk-protein concentrate 7.4; No. 5 – milk-protein concentrate 8.8; No. 6 – milk-protein concentrate 12.0; No. 7 – milk-protein concentrate 16.0.

100 %. Результаты приведены на рис. 3. Все полученные пены были достаточно стабильные первые 5 мин после создания. В дальнейшем скорость разрушения пенных структур была различна и коррелировала с концентрацией белков во вспениваемом растворе.

Известно, что казеиновый комплекс с определенной концентрацией выступает как стабилизатор пенной структуры и при превышении этой концентрации (авторы указывают более 1 %) происходит перенасыщение межфазной пленки белком, что приводит к ухудшению стабильности белковой пены [4, 43]. Поэтому избыток казеина в белковом концентрате снижает устойчивость полученной пены [12].

Выводы

Молочно-белковые концентраты из обезжиренного молока подтвердили наличие перспективных пенообразующих характеристик. Концентраты с самым высоким содержанием белка (16 %) имели большую вспениваемость (рис. 3) и большую устойчивость к разрушению (табл. 2–3). Восстановленное обезжиренное молоко и концентраты его белков идеально подходят для производства пены, поскольку они обеспечат как

хорошую пенообразовательную способность, так и стабильность продуктов на их основе. Известно, что размеры пузырьков и стабильность пены достаточно тесно связаны. Однородность пены с пузырьками малого диаметра обеспечивает замедление механизмов дестабилизации за счет наименьшей скорости истечения жидкости с поверхности, более медленной адсорбции газа между ними и обеспечивает лучшее качество готовой пены при уменьшенном объеме стабилизаторов с увеличением срока хранения. Пенообразующая способность растворов зависит как от общего содержания белка, так и от соотношения казеин/сывороточный белок, поэтому если для повышения белкового содержания не проводить концентрирование, а вносить уже готовый концентрат, то следует отдавать предпочтение сывороточным белкам. Однако это не исключает использование и концентрата казеина, доза внесения которого должна контролироваться.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что конфликта интересов нет.

Финансирование

Материалы подготовлены без финансовой поддержки.

Список литературы

1. Patino, J. M. R. Implications of interfacial characteristics of food foaming agents in foam formulations / J. M. R. Patino, C. C. Sanchez, M. R. R. Nino // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2008. – Vol. 140, № 2. – P. 95–113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2007.12.007>.
2. Dickinson, E. Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers / E. Dickinson // *Food Hydrocolloids*. – 2009. – Vol. 23, № 6. – P. 1473–1482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.08.005>.
3. Edible foam based on Pickering effect of probiotic bacteria and milk proteins / C. Yucel Falco, X. Geng, M. Cárdenas [et al.] // *Food Hydrocolloids*. – 2017. – Vol. 70. – P. 211–218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.04.003>.
4. Physico-chemical factors controlling the foamability and foam stability of milk proteins: Sodium caseinate and whey protein concentrates / K. G. Marinova, E. S. Basheva, B. Nenova [et al.] // *Food Hydrocolloids*. – 2009. – Vol. 23, № 7. – P. 1864–1876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.03.003>.
5. Prosekov, A. Yu. Nutritional features of indigenous peoples of Siberia and North America: are we relatives? / A. Yu. Prosekov, S. A. Ivanova // *Journal of Ethnic Foods*. – 2018. – Vol. 5, № 3. – P. 155–160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jef.2018.07.002>.
6. Dickinson, E. Food emulsions and foams: Stabilization by particles / E. Dickinson // *Current Opinion in Colloid and Interface Science*. – 2010. – Vol. 15, № 1–2. – P. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2009.11.001>.
7. Designing Multiscale Structures for Desired Properties of Ice Cream / J. F. Crilly, A. B. Russell, A. R. Cox [et al.] // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. – 2008. – Vol. 47, № 17. – P. 6362–6367. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie701773z>.
8. Formation and stability of food foams and aerated emulsions: Hydrophobins as novel functional ingredients / A. J. Green, K. A. Littlejohn, P. Hooley [et al.] // *Current Opinion in Colloid and Interface Science*. – 2013. – Vol. 18, № 4. – P. 292–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2013.04.008>.
9. Campbell, G. M. Creation and characterisation of aerated food products / G. M. Campbell, E. Mougeot // *Trends in Food Science and Technology*. – 1999. – Vol. 10, № 9. – P. 283–296. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(00\)00008-X](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(00)00008-X).
10. Möbius, D. Proteins at liquid interfaces. Volume 7 / D. Möbius, R. Miller. – Amsterdam : Elsevier, 1998. – 497 p.
11. Иванова, С. А. Интенсификация технологий аэрированных молочных продуктов / С. А. Иванова, А. Ю. Просеков. – Кемерово : Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2011. – 240 с.
12. Foaming properties of skim milk powder fortified with milk proteins / L. P. Martínez-Padilla, V. García-Mena, N. B. Casas-Alencáster [et al.] // *International Dairy Journal*. – 2014. – Vol. 36, № 1. – P. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2013.11.011>.
13. Murray, B. S. Stabilization of bubbles and foams / B. S. Murray // *Current Opinion in Colloid and Interface Science*. – 2007. – Vol. 12, № 4–5. – P. 232–241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2007.07.009>.

14. Differences between protein and surfactant foams: microscopic properties, stability and coarsening / A. Saint-Jalmes, M.-L. Peugeot, H. Ferraz [et al.] // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2005. – Vol. 263, № 1–3. – P. 219–225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.02.002>.
15. Ivanova, S. A. Stochastic modeling of protein solution foaming process / S. A. Ivanova, V. A. Pavskii // *Theoretical foundations of chemical engineering*. – 2014. – Vol. 48, № 6. – P. 848–854. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040579514040198>.
16. Temperature effect on foamability, foam stability, and foam structure of milk / K. Oetjen, C. Bilke-Krause, M. Madani [et al.] // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2014. – Vol. 460. – P. 280–285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.01.086>.
17. Effect of milk homogenization and foaming temperature on properties and microstructure of foams from pasteurized whole milk / K. Borchering, W. Hoffmann, P. C. Lorenzen [et al.] // *LWT – Food Science and Technology*. – 2008. – Vol. 41, № 10. – P. 2036–2043. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.11.020>.
18. The influence of temperature on the foaming of milk / S. Kamath, T. Huppertz, A. V. Houlihan [et al.] // *International Dairy Journal*. – 2008. – Vol. 18, № 10–11. – P. 994–1002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.05.001>.
19. Kamath, S. Relationship between surface tension, free fatty acid concentration and foaming properties of milk / S. Kamath, A. Wulandewi, H. C. Deeth // *Food Research International*. – 2008. – Vol. 41, № 6. – P. 623–629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.03.014>.
20. Huppertz, T. Foaming properties of milk: A review of the influence of composition and processing / T. Huppertz // *International Journal of Dairy Technology*. – 2010. – Vol. 63, № 4. – P. 477–488. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2010.00629.x>.
21. Effects of manufacturing conditions on the foaming properties of milk and sensory characteristics of foamed milk / S. Hatakeyama, M. Akiyama, R. Yoneyama [et al.] // *LWT*. – 2019. – Vol. 99. – P. 555–561. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.082>.
22. Abascal, D. M. Surface tension and foam stability of commercial calcium and sodium caseinates / D. M. Abascal, J. Gracia-Fadrique // *Food Hydrocolloids*. – 2009. – Vol. 23, № 7. – P. 1848–1852. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.02.012>.
23. Borchering, K. Effect of protein content, casein-whey protein ratio and pH value on the foaming properties of skimmed milk / K. Borchering, P. C. Lorenzen, W. Hoffmann // *International Journal of Dairy Technology*. – 2009. – Vol. 62, № 2. – P. 161–169. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2009.00472.x>.
24. Milk whey proteins and xanthan gum interactions in solution at the air-water interface: a rheokinetic study / A. A. Pérez, C. C. Sánchez, J. M. R. Patino [et al.] // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. – 2010. – Vol. 81, № 1. – P. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2010.06.021>.
25. Направленный ферментализ белков молочной сыворотки / К. А. Берёзкина, Е. Ю. Агаркова, В. Г. Будрик [и др.] // *Переработка молока*. – 2014. – Т. 177, № 7. – С. 20–22.
26. Enhanced foaming and emulsifying properties of high-pressure-jet-processed skim milk / C. A. Hettiarachchi, M. Corzo-Martínez, M. S. Mohan [et al.] // *International Dairy Journal*. – 2018. – Vol. 87. – P. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.06.004>.
27. Phan, C. Dynamic adsorption of beta-casein at the gas–liquid interface / C. M. Phan, A. V. Nguyen, G. M. Evans // *Food Hydrocolloids*. – 2006. – Vol. 20, № 2–3. – P. 299–304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.03.019>.
28. Foegeding, E. A. Factors determining the physical properties of protein foams / E. A. Foegeding, P. J. Luck, J. P. Davis // *Food Hydrocolloids*. – 2006. – Vol. 20, № 2–3. – P. 284–292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.03.014>.
29. Иванова, С. А. Стохастические модели технологических процессов переработки дисперсных систем обезжиренного молока / С. А. Иванова. – Кемерово : КемТИПП, 2010. – 123 с.
30. Просеков, А. Ю. Параметры аэрирования молочно-белковых концентратов / А. Ю. Просеков, С. А. Иванова // *Молочная промышленность*. – 2011. – № 8. – С. 40–42.
31. Иванова, С. А. Стохастическая модель работы пеногенератора на основе теории марковских процессов / С. А. Иванова, В. А. Павский, А. Ю. Просеков // *Хранение и переработка сельхозсырья*. – 2010. – № 6. – С. 18–20.
32. Физико-химические методы анализа / В. Б. Алесковский, В. В. Бардин, Е. С. Бойчинова [и др.]. – Л. : Химия, 1971. – 424 с.
33. Антипова, Л. В. Методы исследования мяса и мясных продуктов / Л. В. Антипова, И. А. Глотова, И. А. Рогов. – М. : Колос, 2001. – 376 с.
34. Барковский, В. Ф. Основы физико-химических методов анализа / В. Ф. Барковский, Т. Б. Гордыщева, Н. Б. Топорова. – М. : Высшая школа, 1983. – 248 с.
35. Жданова, Е. Ф. Исследование белковых веществ коровьего молока методом электрофореза на фильтровальной бумаге / Е. Ф. Жданова, И. Н. Влодавец // *Биохимия*. – 1959. – Т. 24, № 6. – С. 73–85.
36. Крусь, Г. Н. Методы исследования молока и молочных продуктов / Г. Н. Крусь, А. М. Шалыгина, З. В. Волокитина. – М. : Колос, 2000. – 368 с.
37. Krotov, V. V. A new method for studying foaminess / V. V. Krotov, A. G. Nekrasov, A. I. Rusanov // *Colloid Journal*. – 2002. – Vol. 64, № 6. – P. 793–795.
38. Лабораторный практикум по общей технологии пищевых продуктов / З. Ф. Фалунина, И. А. Евницкая, Л. А. Виноградова [и др.]. – М. : Пищевая промышленность, 1978. – 271 с.

39. Кругляков, П. М. Пена и пенные пленки / П. М. Кругляков, Д. Р. Ексерова. – М. : Химия, 1990. – 432 с.
40. Иванова, С. А. Критерии оценки качества формирования газожидкостных дисперсных систем молочного сырья / С. А. Иванова // Техника и технология пищевых производств. – 2011. – Т. 21, № 2. – С. 33–38.
41. Ye, A. Interfacial composition and stability of emulsions made with mixtures of commercial sodium caseinate and whey protein concentrate / A. Ye // Food Chemistry. – 2008. – Vol. 110, № 4. – P. 946–952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.091>.
42. Zhang, Z. Effect of pH and ionic strength on competitive protein adsorption to air/water interfaces in aqueous foams made with mixed milk proteins / Z. Zhang, D. G. Dalgleish, H. D. Goff // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. – 2004. – Vol. 34, № 2. – P. 113–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2003.11.009>.
43. Sánchez, C. C. Interfacial, foaming and emulsifying characteristics of sodium caseinate as influenced by protein concentration in solution / C. C. Sánchez, J. M. R. Patino // Food Hydrocolloids. – 2005. – Vol. 19, № 3. – P. 407–416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2004.10.007>.

References

1. Patino J.M.R., Sanchez C.C., and Nino M.R.R. Implications of interfacial characteristics of food foaming agents in foam formulations. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2008, vol. 140, no. 2, pp. 95–113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2007.12.007>.
2. Dickinson E. Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers. *Food Hydrocolloids*, 2009, vol. 23, no. 6, pp. 1473–1482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.08.005>.
3. Yucel Falco C., Geng X., Cárdenas M., and Risbo J. Edible foam based on Pickering effect of probiotic bacteria and milk proteins. *Food Hydrocolloids*, 2017, vol. 70, pp. 211–218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.04.003>.
4. Marinova K.G., Basheva E.S., Nenova B., et al. Physico-chemical factors controlling the foamability and foam stability of milk proteins: Sodium caseinate and whey protein concentrates. *Food Hydrocolloids*, 2009, vol. 23, no. 7, pp. 1864–1876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.03.003>.
5. Prosekov A.Yu. and Ivanova S.A. Nutritional features of indigenous peoples of Siberia and North America: are we relatives? *Journal of Ethnic Foods*, 2018, vol. 5, no. 3, pp. 155–160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jef.2018.07.002>.
6. Dickinson E. Food emulsions and foams: Stabilization by particles. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2010, vol. 15, no. 1–2, pp. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2009.11.001>.
7. Crilly J.F., Russell A.B., Cox A.R., and Cebola D.J. Designing Multiscale Structures for Desired Properties of Ice Cream. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2008, vol. 47, no. 17, pp. 6362–6367. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie701773z>.
8. Green A.J., Littlejohn K.A., Hooley P., and Cox P.W. Formation and stability of food foams and aerated emulsions: Hydrophobins as novel functional ingredients. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2013, vol. 18, no. 4, pp. 292–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2013.04.008>.
9. Campbell G.M. and Mougeot E. Creation and characterisation of aerated food products. *Trends in Food Science and Technology*, 1999, vol. 10, no. 9, pp. 283–296. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(00\)00008-X](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(00)00008-X).
10. Möbius D. and Miller R. Proteins at liquid interfaces. Volume 7. Amsterdam: Elsevier Publ., 1998. 497 p.
11. Ivanova S.A. and Prosekov A.Yu. *Intensifikatsiya tekhnologiy aehrirovannykh molochnykh produktov* [Intensification of aerated dairy products technologies]. Kemerovo: KemIFST Publ., 2011. 243 p. (In Russ.).
12. Martínez-Padilla L.P., García-Mena V., Casas-Alencáster N.B., and Sosa-Herrera M.G. Foaming properties of skim milk powder fortified with milk proteins. *International Dairy Journal*, 2014, vol. 36, no. 1, pp. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2013.11.011>.
13. Murray B.S. Stabilization of bubbles and foams. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2007, vol. 12, no. 4–5, pp. 232–241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2007.07.009>.
14. Saint-Jalmes A., Peugeot M.-L., Ferraz H., and Langevin D. Differences between protein and surfactant foams: microscopic properties, stability and coarsening. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2005, vol. 263, no. 1–3, pp. 219–225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.02.002>.
15. Ivanova S.A. and Pavskii V.A. Stochastic modeling of protein solution foaming process. *Theoretical foundations of chemical engineering*, 2014, vol. 48, no. 6, pp. 848–854. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040579514040198>.
16. Oetjen K., Bilke-Krause C., Madani M., and Willers T. Temperature effect on foamability, foam stability, and foam structure of milk. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2014, vol. 460, pp. 280–285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.01.086>.
17. Borcherdig K., Hoffmann W., Lorenzen P.C., and Schrader K. Effect of milk homogenization and foaming temperature on properties and microstructure of foams from pasteurized whole milk. *LWT – Food Science and Technology*, 2008, vol. 41, no. 10, pp. 2036–2043. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.11.020>.
18. Kamath S., Huppertz T., Houlihan A.V., and Deeth H.C. The influence of temperature on the foaming of milk. *International Dairy Journal*, 2008, vol. 18, no. 10–11, pp. 994–1002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.05.001>.
19. Kamath S., Wulandewi A., and Deeth H.C. Relationship between surface tension, free fatty acid concentration and foaming properties of milk. *Food Research International*, 2008, vol. 41, no. 6, pp. 623–629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.03.014>.
20. Huppertz T. Foaming properties of milk: A review of the influence of composition and processing. *International Journal of Dairy Technology*, 2010, vol. 63, no. 4, pp. 477–488. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2010.00629.x>.
21. Hatakeyama S., Akiyama M., Yoneyama R., et al. Effects of manufacturing conditions on the foaming properties of milk and sensory characteristics of foamed milk. *LWT*, 2019, vol. 99, pp. 555–561. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.082>.

22. Abascal D.M. and Gracia-Fadrique J. Surface tension and foam stability of commercial calcium and sodium caseinates. *Food Hydrocolloids*, 2009, vol. 23, no. 7, pp. 1848–1852. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.02.012>.
23. Borcharding K., Lorenzen P.C., and Hoffmann W. Effect of protein content, casein-whey protein ratio and pH value on the foaming properties of skimmed milk. *International Journal of Dairy Technology*, 2009, vol. 62, no. 2, pp. 161–169. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2009.00472.x>.
24. Pérez A.A., Sánchez C.C., Patino J.M.R., Rubiolo A.C., and Santiago L.G. Milk whey proteins and xanthan gum interactions in solution at the air-water interface: a rheokinetic study. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2010, vol. 81, no. 1, pp. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2010.06.021>.
25. Beryozkina K.A., Agarkova E.Yu., Budrik V.G., et al. Napravleny fermentoliz belkov molochnoy syvorotki [Directed fermentolysis of whey proteins]. *Milk Processing*, 2014, vol. 177, no. 7, pp. 20–22. (In Russ.).
26. Hettiarachchi C.A., Corzo-Martínez M., Mohan M.S., and Harte F.M. Enhanced foaming and emulsifying properties of high-pressure-jet-processed skim milk. *International Dairy Journal*, 2018, vol. 87, pp. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.06.004>.
27. Phan C.M., Nguyen A.V., and Evans G.M. Dynamic adsorption of beta-casein at the gas-liquid interface. *Food Hydrocolloids*, 2006, vol. 20, no. 2–3, pp. 299–304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.03.019>.
28. Foegeding E.A., Luck P.J., and Davis J.P. Factors determining the physical properties of protein foams. *Food Hydrocolloids*, 2006, vol. 20, no. 2–3, pp. 284–292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.03.014>.
29. Ivanova S.A. *Stokhasticheskie modeli tekhnologicheskikh protsessov pererabotki dispersnykh sistem obezzhirenogo moloka* [Stochastic models of technological processes for processing dispersed systems of skimmed milk]. Kemerovo: KemIFST Publ., 2010. 123 p. (In Russ.).
30. Prosekov A.Yu. and Ivanova S.A. Parameters of the milk-protein concentrates aeration. *Dairy industry*, 2011, no. 8, pp. 40–42. (In Russ.).
31. Ivanova S.A., Pavskiy V.A., and Prosekov A.Yu. Stochastic model of foam generator working on the basis of the Markov processes theory. *Storage and processing of farm products*, 2010, no. 6, pp. 18–20. (In Russ.).
32. Aleskovskiy V.B., Bardin V.V., Boychinova E.S., et al. *Fiziko-khimicheskie metody analiza* [Physico-chemical methods of analysis]. Leningrad: Chemistry Publ., 1971. 424 p. (In Russ.).
33. Antipova L.V., Glotova I.A., and Rogov I.A. *Metody issledovaniya myasa i myasnykh produktov* [Methods of research of meat and meat products]. Moscow: Kolos Publ., 2001. 376 p. (In Russ.).
34. Barkovskiy V.F., Gorodysheva T.B., and Toporova N.B. *Osnovy fiziko-khimicheskikh metodov analiza* [Fundamentals of physico-chemical methods of analysis]. Moscow: Higher School Publ., 1983. 248 p. (In Russ.).
35. Zhdanova E.F. and Vlodavets I.N. Issledovanie belkovykh veshchestv korov'ego moloka metodom ehlektroforeza na fil'troval'noy bumage [The study of cow's milk proteins by electrophoresis on filter paper]. *Biochemistry*, 1959, vol. 24, no. 6, pp. 73–85. (In Russ.).
36. Krus' G.N., Shalygina A.M., and Volokitina Z.V. *Metody issledovaniya moloka i molochnykh produktov* [Methods of research of milk and dairy products]. Moscow: Kolos Publ., 2000. 368 p. (In Russ.).
37. Krotov V.V., Nekrasov A.G., and Rusanov A.I. A new method for studying foaminess. *Colloid Journal*, 2002, vol. 64, no. 6, pp. 793–795.
38. Falunina Z.F., Evnitskaya I.A., Vinogradova L.A., et al. *Laboratornyy praktikum po obshchey tekhnologii pishchevykh produktov* [Laboratory workshop on general food technology]. Moscow: Food industry Publ., 1978. 271 p. (In Russ.).
39. Kruglyakov P.M. and Ekserova D.R. *Pena i pennye plenki* [Foam and foam films]. Moscow: Chemistry Publ., 1990. 432 p. (In Russ.).
40. Ivanova S.A. Quality evaluation criteria of gas-liquid disperse system formation of dairy raw material. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2011, vol. 21, no. 2, pp. 33–38. (In Russ.).
41. Ye A. Interfacial composition and stability of emulsions made with mixtures of commercial sodium caseinate and whey protein concentrate. *Food Chemistry*, 2008, vol. 110, no. 4, pp. 946–952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.091>.
42. Zhang Z., Dalgleish D.G., and Goff H.D. Effect of pH and ionic strength on competitive protein adsorption to air/water interfaces in aqueous foams made with mixed milk proteins. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2004, vol. 34, no. 2, pp. 113–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2003.11.009>.
43. Sánchez C.C. and Patino J.M.R. Interfacial, foaming and emulsifying characteristics of sodium caseinate as influenced by protein concentration in solution. *Food Hydrocolloids*, 2005, vol. 19, no. 3, pp. 407–416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2004.10.007>.

Иванова Светлана Анатольевна

д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой общей математики и информатики, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650056, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (3842) 39-68-32, e-mail: pavvm2000@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-1252-9572>

Svetlana A. Ivanova

Dr.Sci.(Eng.), Associate Professor, Head of the Department of General Mathematics and Informatics, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-32, e-mail: pavvm2000@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-1252-9572>