

**Кузнецов Павел Владимирович, вед.н.с., к.т.н.,
Габриелова Валентина Тихоновна, с.н.с.**
ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной
промышленности» (Россия, г.Москва)

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ ПРОДУКТОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗЦМ

Аннотация. При создании искусственных дисперсных структур, и в частности высокожирных эмульсий, слои эмульгатора и полисахарида представляют собой супрамолекулярный ансамбль, процесс образования которого подчиняется вероятностному закону. Вероятность захвата молекул жировыми частицами зависит от их взаимного размера, молекулярных масс, структурной формы, электрического потенциала различных частей. Эффективность столкновения увеличивается при турбулизации среды взаимодействия, которую можно характеризовать величиной диссипации энергии. Для гарантированного протекания процесса покрытия частиц той или иной оболочкой (вероятность больше 0,95) необходимо обеспечить величину диссипации энергии свыше 90-160 Вт/кг. При расчете масс оболочечных компонентов необходимо учитывать вероятность столкновения их с жировыми частицами.

Ключевые слова: заменитель цельного молока, дисперсная система, жировая частица, оболочка жировых частиц.

**Kuznetsov Pavel Vladimirovitch, leading researcher, Ph.D.,
Gabriellova Valentina Tikhonovna, senior researcher**
All-Russian Dairy Research Institute (Russia, Moscow)

THE PROBABILISTIC ASPECTS OF THE PROCESS FOR PREPARATION OF MULTICOMPONENT PRODUCT MIXTURES AS APPLIED TO WHOLE MILK REPLACES (WMR)

Abstract. In the process of artificial disperse structures creation, particularly, high-fat emulsions emulsifier and polysaccharide layers represent supra-molecular ensemble the formation process of which obeys the law of probability. The probability of molecules capture by fat particles depends on their mutual size, molecular masses, structural shape, electric potential of different parts. The collision efficiency increases with the turbulence of the interaction medium which can be characterized by the energy dissipation magnitude. To ensure the process of the particles coating with a certain capsule (probability more than 0.95) the energy

dissipation value over 90-160 W/kg is required. Calculating the masses of coating components the probability of their collision with fat particles should be taken into account.

Key words: whole milk replacer, dispersion system, fat particle, fat globules coating.

При производстве искусственных дисперсных структур, к которым, в частности, относятся заменители цельного молока (ЗЦМ), необходимо, в первую очередь, обеспечить стойкость образованных эмульсий, качество и сохранность готового продукта [1-3]. Процесс образования этих эмульсий представляет собой вполне определённую последовательность стадий межмолекулярного взаимодействия между отдельными составляющими эмульсии. При этом вероятностные закономерности течения стадий можно считать аналогичными соответствующим характеристикам процессов коагуляции и флотации в дисперсных системах.

Характер межмолекулярного взаимодействия на границе раздела основных фаз в рассматриваемых системах либо лиофобные (жиры), либо лиофильные (белки). Леофильные дисперсные системы характеризуются высокой степенью родственности дисперсной фазы и дисперсионной среды, а, следовательно, и малой интенсивностью поверхностных сил на границе раздела фаз. Леофобные дисперсные системы, напротив, характеризуются слабым межфазным взаимодействием и большой интенсивностью поверхностных сил. Последние термодинамически неустойчивы и требуют специальной стабилизации путём предварительного тонкого измельчения и покрытия поверхности образовавшихся при этом мелких частиц веществами, препятствующими их конгломерации. Таким веществом может служить сам белок, находящийся в растворе. Однако, поскольку природа молекул жиров и белков препятствует их взаимной адсорбции, осуществить этот процесс возможно только за счет применения специальных химических соединений, называемых поверхностно-активными веществами (ПАВ) [4,5].

Эти вещества, имея дифильное строение молекул, состоящих из гидрофобных и гидрофильных групп, подобно фосфолипидам молока, выполняют роль соединительного слоя между молекулами жира и белка, что способствует формированию защитной оболочки жировых глобул. Благодаря этому существенно снижается межфазное поверхностное натяжение, резко уменьшается содержание свободного жира, повышается устойчивость эмульсии и ее сохранность.

Процессы образования и формирования оболочек жировых шариков подчиняются вероятностному закону и их интенсивность зависит от первоначальной концентрации компонентов и степени дробления жира. Вероятность образования конгломерата молекул ПАВ на поверхности жировых шариков в единицу времени можно представить в виде произведения:

$$P = \prod_{n=1}^n P_n, \quad (1)$$

где P – вероятность образования конгломерата молекул ПАВ на поверхности жировых частиц; P_n – вероятность столкновения полярных молекул n -го компонента оболочек между собой или их столкновения с жировыми частицами в единицу времени

При этом вероятность соединения полярных молекул ПАВ можно принять равным 0,5, т.к. они могут взаимно располагаться равнополярными или разнополярными сторонами друг к другу, а вероятность закрепления полярных молекул на поверхности жировых частиц после их столкновения можно принять равным единице.

Учитывая, что

$$w_n = \frac{dm_n}{m_n \cdot dt}, \quad (2)$$

для соединения молекул n -го компонента ПАВ в растворе можно записать

$$dm_{Pn} = 0,5 \cdot w_n \cdot m_n \cdot dt, \quad (3)$$

а для закрепления n -го компонента ПАВ на поверхности частиц

$$dm_{cn} = w_n \cdot m_n \cdot dt \quad (4)$$

где m_n – масса n -го компонента в растворе; w_n – скорость изменения массы n -го компонента в растворе.

Эффективность столкновения молекул ПАВ между собой и их столкновения с частицами в растворе зависит от их взаимного размера, молекулярных масс, структурной формы, электрического потенциала различных частей и характеризуются соответственно ε_m и ε_q

$$\varepsilon_{mn} = \frac{l_{mn}^2}{(s_{mn} + l_{mn})^2}, \quad \varepsilon_q = \frac{d_q^2}{(s_{mn} + d_q)^2} \quad (5)$$

где l_{mn} – линейный размер молекул n -го компонента в растворе; d_q – диаметр частиц; s_{mn} – протяженность действия кулоновских сил

Формирование искусственных белковых оболочек около жировых частиц ЗЦМ производят, как правило, путём внесения в эмульсию после диспергирования жира двух видов вспомогательных веществ, одно из которых имеет жировую природу (эмульгатор), а второе водорастворимое (полисахарид). При этом операции по их внесению необходимо разносить во времени и аппаратурно [6-8].

После проведения соответствующих преобразований и подстановок можно получить следующие приближенные выражения, определяющие вероятности столкновения отдельных молекул с частицами жира в единицу времени (т. е. число столкновений, приходящихся на одну частицу):

$$P_{1,2} = \frac{1,5 \cdot d_q^2 \cdot G_{1,2} \cdot t_{1,2} \cdot (1 + \theta_{1,2})^2 \cdot (1 + \bar{u}_{1,2})}{\rho_{1,2} \cdot d_q \cdot (s_{m1,m2} + d_q)}, \quad (6)$$

где $\bar{u}_1 = \frac{u}{u_1}$; $\bar{u}_2 = \frac{u}{u_2}$; $\theta_1 = \frac{d_q}{s_{m1}}$; $\theta_2 = \frac{d_q}{s_{m2}}$; u – скорость жировой частицы; u_1, u_2 – скорости молекул, соответственно, эмульгатора и полисахарида; d_q – диаметр жировой частицы; s_{m1}, s_{m2} – протяженность действия кулоновских сил для молекул, соответственно, эмульгатора и полисахарида; G_1, G_2 – массовый расход раствора через единицу нормального сечения; t_1, t_2 – продолжительность течения процессов внесения, соответственно эмульгатора и полисахарида; ρ_1, ρ_2 – плотность растворов ($\approx 1 \text{ кг/м}^3$)

Формула (6) получена для чисел Рейнольдса менее 1, т.е. для жидкости, которая находится в покое, а плотность растворов составляет около 1 кг/м^3 . Анализ формул (5) и (6) показывает, что величина эффективности столкновения увеличивается с уменьшением размеров вступающих во взаимодействие частиц и при турбулизации среды взаимодействия. В турбулентном потоке на осредненную скорость движения жировых частиц и молекул, накладывается пульсационная скорость. Это приводит к тому, что скорость сближения частицы и молекул возрастает, в результате чего увеличивается и вероятность их столкновения P . При этом, может также увеличиваться и эффективность столкновения, благодаря спрямлению траекторий движения отдельных частиц. При этом, спектр пульсаций имеет различный масштаб: от максимальных пульсаций, характеризующихся внешними параметрами источников турбулизации (габариты, принцип действия, конструкция и мощность перемешивающих устройств), до минимальных, характеризующихся так называемом внутренним масштабом турбулентности ψ_0 . Механизм столкновения отдельных частиц и молекул в значительной мере определяется соотношением их размеров и внутренним масштабом турбулентности, величина которой определяется по формуле:

$$\psi_0 = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости; ϵ – диссипация энергии, представляющая собой мощность, рассеиваемую в единице массы жидкости.

Величина ψ_0 определяется значением, которое весьма существенно изменяется в зависимости от месторасположения данной области в общем объеме раствора. Существующие конструкции перемешивающих устройств характеризуются существенным различием диссипации энергии. При этом, как правило, диссипация энергии в 90% общего объема составляет лишь 0,5-1,0 Вт/кг, в 9,5 % объема – 2,5-5,0 Вт/кг и только в 0,5 % объема – свыше 300 Вт/кг. Данный факт обуславливает необходимость длительной обработки объема раствора для гарантированного (с вероятностью свыше 0,95) столкновения содержащихся в растворе частиц.

В общем случае при диссипации энергии до величины 0,01 Вт/кг вероятность столкновения частиц соответствует вероятности столкновения в спокойной жидкости, а при диссипации уже 0,5 Вт/кг вероятность столкновения увеличивается в 4-7 раз. Таким образом, в турбулентных потоках вероятность столкновения частиц существенно возрастает с увеличением диссипации энергии.

В таблице приведены расчетные величины вероятности столкновения молекул эмульгатора с диспергированными в процессе гомогенизации жировыми частицами и молекул полисахарида с частицами жира, покрытыми слоем эмульгатора, при различных величинах диссипации энергии и концентрации растворов. Все расчеты проведены для жировых частиц диаметром 1 мкм.

Таблица 1 – Расчетные величины вероятности столкновения молекул эмульгатора и полисахарида с частицами жира

Показатель	Концентрация раствора	Величина диссипации энергии (€), Вт/кг			
		40	80	120	160
Вероятность P_1 столкновения молекул эмульгатора с диспергированными в процессе гомогенизации жировыми частицами диаметром 1 мкм	$C_э = 2,5\%$	0,61	0,92	1,00	1,00
	$C_э = 2,1\%$	0,58	0,73	1,00	1,00
	$C_э = 1,7\%$	0,53	0,63	0,94	1,00
	$C_э = 1,3\%$	0,50	0,57	0,78	1,00
Вероятность P_2 столкновения молекул полисахарида с частицами жира диаметром 1 мкм, покрытыми слоем эмульгатора	$C_п = 4,0\%$	0,64	0,82	1,00	1,00
	$C_п = 3,0\%$	0,60	0,76	0,92	1,00
	$C_п = 2,0\%$	0,50	0,59	0,85	1,00

Приведенные данные свидетельствуют, что для гарантированного протекания процесса покрытия частиц той или иной оболочкой (вероятность больше 0,95) необходимо обеспечить величину диссипации энергии свыше 90-160 Вт/кг. Меньшие значения диссипации предполагают увеличение времени обработки растворов вплоть до единиц и десятков секунд.

Выводы. Рассматриваемая физическая модель определяет последовательность образования оболочек жировых частиц. Процесс построения слоёв эмульгатора и полисахарида имеет самопроизвольный характер и подчиняется вероятностному закону. Поскольку слой эмульгатора имеет жировую природу, а полисахарид, составляющий второй слой, водорастворимый, необходимо разносить операции по их нанесению во времени и аппаратно. Эффективность столкновения увеличивается с уменьшением размеров вступающих во взаимодействие частиц и при турбулизации среды взаимодействия, которую можно характеризовать величиной диссипации энергии. В турбулентных потоках вероятность столкновения частиц существенно возрастает с увеличением диссипации энергии. Для гарантированного протекания процесса покрытия частиц той или иной оболочкой (вероятность больше 0,95) необходимо обеспечить величину диссипации энергии свыше 90-160 Вт/кг. Меньшие

значения диссипации предполагают увеличение времени обработки растворов вплоть до единиц и десятков секунд.

Список литературы

1. Харитонов В.Д., Филатов Ю.И. Заменители цельного молока. Проблемы и перспективы // Молочная промышленность. 2004. № 7. С.56-57.
2. Асафов В.А., Танькова Н.Л., Искакова Е.Л. Анализ современных способов производства ЗЦМ для кормления молодняка сельскохозяйственных животных // Эффективное животноводство. 2019. № 4. С. 36-38.
3. Филатов Ю.И. Становление и развитие науки о производстве ЗЦМ // Молочная промышленность. 2004. № 12. С.80-81.
4. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. Свойства и применение. Л.: Химия, 1975. 248 с.
5. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Избранные труды. Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. 384 с.
6. Асафов В.А. Современные технологии производства высококачественных кормов для кормления молодняка сельскохозяйственных животных // Эффективное животноводство. 2019. № 7. С. 74-78. DOI: 10.24411/9999-007A-2019-1060.
7. Филатов Ю.И., Пухова Н.А., Кузнецов П.В., Смокотин Е.В., Габриелова В.Т. Жировой компонент для производства ЗЦМ сухим смешиванием // Молочная промышленность. 2009. № 12. С.44-45.
8. Филатов Ю.И. Производство ЗЦМ и перспективы его развития // Главный зоотехник. 2006. № 4. С. 32-34.