

УДК 637.232.14.001

**Чеботарев Евгений Алексеевич, Малсугенов Александр Владимирович,
Лямина Алла Амировна**

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДИСПЕРСНЫХ ФАЗ В МЕЖТАРЕЛОЧНЫХ ПРОСТРАНСТВАХ ПРИ СЕПАРИРОВАНИИ МОЛОКА И МОЛОЧНОГО СЫРЬЯ

Получена уточненная математическая модель взаимодействия дисперсных фаз в межтарелочных пространствах сепаратора. Модель позволяет произвести вероятностную оценку столкновения дисперсных частиц легкой (молочного жира) и тяжелой фракций в процессе сепарирования молока и молочных продуктов с учетом их полидисперсности, а также некоторых конструктивных параметров барабана сепаратора. Последние использованы для получения соотношения скоростей дисперсных частиц, и их варьирование позволяет оптимизировать процесс сепарирования для сокращения взаимодействия легких и тяжелых дисперсных частиц.

Ключевые слова: дисперсные частицы, взаимодействие, вероятностная оценка, зоны коагуляции, число столкновений.

**Evgeny Chebotarev, Aleksandr Malsugenov, Alla Lyamina
INTERACTION OF DISPERSED PHASES IN TRAY SPACING
OF SEPARATOR WHEN SEPARATION OF MILK AND DAIRY RAW MATERIALS**

Specified mathematical model of the interaction of dispersed phases in tray spacing of separator was obtained. The model allows to generate a probabilistic assessment of the collision of dispersed particles of light (milk fat) and heavy fractions during the process of separation of milk and milk products in accordance with their polydispersity, as well as some structural parameters of the separator drum. These parameters were used to obtain speed ratios of dispersed particles. Their variation allows to optimize separation process reducing the interaction of the light and heavy particles.

Key words: particulate matter, interaction, probabilistic assessment, coagulation zone, the number of collisions.

Одним из основных допущений теории сепарирования является то, что дисперсная частица движется в межтарелочном пространстве обособленно. Фактически частицы движутся там достаточно стесненно, взаимодействуя друг с другом. Причем следует различать положительное для разделения взаимодействие частиц одной дисперсной фазы, но разного размера, и отрицательное для разделения взаимодействие частиц тяжелой дисперсной фазы с частицами легкой дисперсной фазы. Второе может привести к уносу легкой дисперсной фазы в осадок, а потому считается отрицательным по достигаемому эффекту. Именно вторая задача является наиболее актуальной при рассмотрении процессов сепарирования молока и молочного сырья.

Все взаимодействия частиц в барабане сепаратора носят случайный характер, а потому оценка их взаимодействия может быть проведена на основе решения соответствующих вероятностных задач.

Решение вероятностных задач для процессов центробежного разделения по сути своей является определением изменения гранулометрического состава частиц в поле центробежных сил, а также оценкой частоты столкновения и коагуляции частиц на основе использования различных математических моделей взаимодействия дисперсных частиц. Различие в предлагаемых методиках вероятностной оценки взаимодействия частиц заключается главным образом в выборе допущений и параметрической характеристике дисперсной системы (монодисперсная, полидисперсная).

Г. И. Трушиным и Н. Н. Липатовым [3] сделана попытка дать вероятностную оценку процесса коагуляции легких и тяжелых частиц при встречном движении их в межтарелочных пространствах при сепарировании молока. Позднее математическая модель для оценки этого взаимодействия предложена Л. М. Белоконов с Т. В. Сергеевой [2], а затем несколько усовершенствована с В. В. Филимоновой [1].

При использовании интегральной теоремы Лапласа была получена формула для оценки вероятности соприкосновения движущихся частиц. Причем, сделав предположения, что отношение скоростей твердых частиц и жировых шариков равно 2, они получили, что вероятность столкновения частиц практически равна 1.

Но в таком случае есть основания полагать, что все жировые шарики (легкая дисперсная фаза), сталкиваясь с частицами тяжелой дисперсной фазы, будут уноситься последними в осадок. Поскольку на практике этого не происходит, можно предположить другое – далеко не все столкновения частиц приводят к образованию объединенной частицы. Но тогда это противоречит одному из условий рассмотрения данной задачи, что частицы слипаются при каждом соприкосновении. Отсюда следует, что для решения указанной вероятностной задачи необходим несколько иной подход.

Для практического решения данной задачи необходимо также исключить и другое ограничительное условие о том, что системы монодисперсны, т. е. размер частиц каждой из них строго постоянный. В противном случае с учетом достаточно высокой полидисперсности систем в молоке и молочном сырье решение будет слишком отличным от реального. Но, как и прежде, принимаем, что частицы имеют шарообразную форму, а также не учитывается их тепловая коагуляция.

Н. Н. Липатов [3] определил непосредственно в межтарелочном пространстве 3 зоны коагуляции частиц (четвертая – на входе в межтарелочные пространства).

Обозначенная им зона встречных столкновений и сопутного движения частиц по размерам и по своей важности является основной.

В ней тяжелые и легкие частицы сталкиваются вследствие их встречного движения, а также одновременного сопутного движения, когда более крупные частицы догоняют и сталкиваются с мелкими. Здесь, видимо, происходит также и градиентная коагуляция, т. е. коагуляция при наличии поперечного градиента скорости. Таким образом, задача определения вероятности взаимодействия частиц легкой и тяжелой дисперсной фазы сводится к определению вероятности столкновения разных по плотности частиц в зоне встречных столкновений и сопутного движения частиц.

Основываясь на формуле, полученной в работе [1] определим, что число столкновений частиц радиуса r (легкая дисперсная фаза), находящаяся в 1 см^3 , с частицами радиуса R (тяжелая дисперсная фаза) по истечении некоторого времени от начала их встречных столкновений будет равно:

$$a = n \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha N}}{2} e^{-\alpha N \left[S \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) - 1 \right]} \right), \quad (1)$$

где a – число столкновений; n , N – число частиц соответственно радиуса r и R ; S – длина пути потока частиц; α – вероятность соприкосновения движущихся навстречу друг другу частиц обоих радиусов; v_1 , v_2 – скорости встречного движения частиц.

Перейдем к рассмотрению входящих в формулу (1) величин. Величина α определена как $\alpha = \pi(R+r)^2$. С учетом принятого допущения, что r величина неизменная, а R – переменная, запишем

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_i}{m} = \frac{\pi \sum_{i=1}^m (R_i + r)^2}{m}, \quad (2)$$

где R_i – радиус частицы i -го размерного класса, где i изменяется от 1 до m .

Число частиц n (жировых шариков) будем считать изменяющимся только за счет их коагуляции с частицами радиуса R , как это было учтено при выводе формулы (1). Т. е. не учитывается уменьшение количества частиц в зоне коагуляции за счет их оседания на поверхности тарелки или переход в зону II.

С другой стороны, количество тяжелых частиц – величина, изменяющаяся по мере движения потока вдоль образующей конической поверхности межтарелочного пространства, т. е. $N = f(S)$.

Получить данную функцию можно следующим образом. Скорость выделения (стоксовская) частиц по известной формуле будет равна

$$v_2 = \frac{2}{9} \omega^2 R_B \frac{\Delta \rho}{\eta} R^2, \quad (3)$$

где ω – угловая скорость вращения барабана; R_B – радиус положения частицы в межтарелочном пространстве; $\Delta \rho$ – разность плотностей дисперсной частицы и плазмы; η – вязкость плазмы.

Будем считать, что в среднем каждая частица должна преодолеть расстояние равное половине расстояния между тарелками (h) по горизонтали. Тогда время, необходимое для преодоления этого расстояния будет равно

$$t = \frac{h}{2v_2} = \frac{9h\eta}{4\omega^2 R_B \Delta \rho R^2}, \quad (4)$$

За это время поток преодолеет расстояние S вдоль образующей тарелки. Будем считать точкой отсчета пути частицы максимальный радиус образующей тарелки. Тогда

$$S = \frac{v' - v''}{2} \cdot t = \frac{M}{2\pi R_{\max} z h \sin \gamma} + \frac{M}{2\pi R_B z h \sin \gamma} \cdot \frac{t}{2}, \quad (5)$$

где v' и v'' – скорость потока в начале движения в любом произвольном сечении межтарелочного пространства; M – производительность сепаратора; z – число межтарелочных пространств; γ – угол наклона образующей тарелок.

Преобразовав формулу и заменив $R_B = R_{\max(\min)} - S \cos \gamma$, получим

$$S = \frac{M(2R_{\max(\min)} - S \cos \gamma)t}{4\pi z(R_{\max(\min)} - S \cos \gamma)R_{\max(\min)} h \sin \gamma}, \quad (6)$$

где $R_{\max(\min)}$ – максимальный и минимальный радиусы образующей тарелки соответственно для сходящегося или расходящегося межтарелочного потока.

Отсюда

$$t = \frac{4\pi z S (R_{\max(\min)} - S \cos \gamma) R_{\max(\min)} h \sin \gamma}{M(2R_{\max(\min)} - S \cos \gamma)}, \quad (7)$$

Приравняв правые части формул (4) и (7) и, выразив R , получим

$$R = \frac{3}{4\omega^2 (R_{\max(\min)} - S \cos \gamma)} \sqrt{\frac{M(2R_{\max(\min)} - S \cos \gamma)\eta}{\pi z S R_{\max(\min)} \sin \gamma \Delta \rho}}, \quad (8)$$

Для получения функции $N = f(S)$, т. е. зависимости количества частиц от длины потока частиц, необходимо знать их интегральные и дифференциальные функции распределения по размерным классам.

Массу 100 частиц, для которых рассчитана интегральная функция распределения, можно определить по формуле

$$m_{100} = \frac{4\pi \rho_c \sum_{i=1}^m N_i R_i^3}{3}, \quad (9)$$

где m_{100} – масса 100 частиц; ρ_c – плотность сухих частиц; N_i – количество (в %) жировых шариков размера, выбирается по дифференциальной функции распределения; m – число размерных классов.

Содержание (массовая доля) дисперсных частиц (C , %) определяется формулой

$$C = K_u \frac{m_{100}}{m_m} \cdot 100 = K_u \frac{4\pi\rho_c \sum_{i=1}^m N_i R_i^3}{3\rho_m} \cdot 100, \quad (10)$$

где K_u – коэффициент, учитывающий фактическое количество частиц по отношению к расчетному значению (100); m_m – масса единичного объема молока (молочного сырья); ρ_m – плотность молока (молочного сырья).

Отсюда можно определить

$$K_u = \frac{3\rho_{сыр} C}{400\pi\rho_c \sum_{i=1}^m N_i R_i^3}, \quad (11)$$

а общее количество дисперсных частиц в единице объема будет равно

$$N_0 = 100 \cdot K_u, \quad (12)$$

Количество же частиц размером от 0 до R_i можно будет определить по формуле

$$N = K_u [100 - \Phi(R_i)], \quad (13)$$

где $\Phi(R_i)$ – интегральная функция распределения частиц, %.

Таким образом, используя полученные формулы, можно найти зависимость $N = f(S)$.

Отношение скоростей тяжелой и легкой дисперсных фаз в работе [3] определено равным 2. В принятом нами допущении о том, что легкие дисперсные частицы движутся вместе и со скоростью потока, предполагается учесть фактическое изменение отношения скоростей по ходу движения потока в межтарелочном зазоре.

Воспользуемся расчетной схемой, приведенной на рисунке. Предлагается вместо отношения v_2/v_1 использовать отношение $v_2 \cos \gamma / v_1$, которое обозначим v_{21}/v_{11} . Тогда получим

$$\frac{v_{21}}{v_{11}} = \frac{4\pi\omega^2(R_{\max(\min)} - S \cos \gamma)^2 z h \cos \gamma \sin \gamma}{9M} \cdot \frac{\Delta\rho}{\eta} R^2, \quad (14)$$

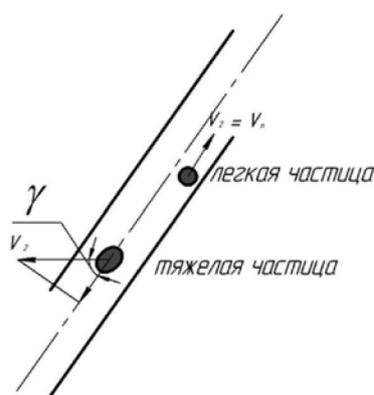


Рис. Расчетная схема

И ещё одно важное изменение в формулировку исходных требований при определении вероятности столкновений частиц легкой и тяжелой дисперсной фазы. Количество тяжелых дисперсных частиц N_i по мере движения потока от периферии шламового пространства к центру изменяется от своего максимального значения до 0.

С другой стороны, можно считать, что жировые шарики оседают на поверхности нижней тарелки межтарелочного пространства в незначительном количестве и потому все находятся в зоне I и участвуют во взаимодействии с тяжелыми частицами.

Данная методика использована для анализа влияния взаимодействия дисперсных фаз в межтарелочных пространствах осветлительного пакета комбинированного сепаратора для молочной сыворопки на процесс сепарирования. Такой анализ позволяет оптимизировать процесс сепарирования с точки зрения сокращения взаимодействия легких и тяжелых дисперсных частиц.

Литература

1. Белоконь Л. М., Филимонова В. В. Вероятностные оценки взаимодействия частиц встречных потоков сепарируемого молока // Известия вузов: Пищевая технология, 1997. № 1. С. 45–47.
2. Белоконь Л. М., Сергеева Т. В. Вероятность столкновений частиц при встречном движении потоков при сепарировании молока // Известия вузов: Пищевая технология. 1989. № 2. С. 79–82.
3. Липатов Н. Н. Сепарирование в молочной промышленности. М.: Пищевая промышленность, 1971. 400 с.