

УДК 637.13:66.069.85

С.А.Иванова, М.В. Баканов

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МОЛОЧНО-БЕЛКОВЫХ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ СТОХАСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Построена стохастическая модель, позволяющая изучить процесс образования и разрушения газожидкостной дисперсной системы. Особенность модели заключается в том, что процесс пенообразования характеризуется математическим ожиданием и дисперсией числа пузырьков, а процесс разрушения – функцией, являющейся одним из параметров, входящих в математическое ожидание.

Аэрированные молочные продукты, устойчивость, стохастическая модель, математическое ожидание, дисперсия.

Введение

Вследствие неустойчивости газожидкостных дисперсных систем (ГДС) процесс газонасыщения одно- временно состоит из образования и разрушения полученного газожидкостного слоя, в некоторых случаях начинающихся практически с самого начала. Кроме того, в силу природы самого процесса, на качество готового продукта существенно влияет фактор случайности. Следовательно, эффективность работы пеногенератора можно описать вероятностной моделью.

Целью является изучение стохастическими методами процесса пенообразования молочного сырья и определение времени, достаточного для получения газо- жидкостной дисперсной системы заданного качества.

Материалы и методы

Из пеногенераторов, используемых в пищевой промышленности, наиболее эффективны роторно- пульсационные устройства (РПУ), которые интенсифицируют процесс пенообразования за счет совместного гидромеханического, акустического, вибрационного воздействия на обрабатываемый раствор, а также позволяют вспенивать растворы повышенной вязкости. Газонасыщение проводили роторно- пульсационной обработкой молочного-белкового концентрата (МБК) при скорости вращения ротора 1750–3000 об/мин; при коэффициенте заполнения рабочей камеры 0,3; при величине зазора между ротором и статором 0,1 мм; при температуре обрабатываемого раствора (24±2) °С. В качестве обрабатываемой основы рассматривали молочный-белковый концентрат с содержанием белка 16% масс.

Для изучения влияния продолжительности процесса газонасыщения МБК применяли стохастическую модель [1], описывающую эффективность работы пеногенератора. В качестве показателей эффективности функционирования системы использовали математическое ожидание (среднее значение) $M_i(\tau)$ случайной величины, характеризующей число единиц (пузырьков) пены, составляющей готовый продукт в момент времени τ при условии, что в начальный момент времени τ_0 их число было равно i , и среднее квадратичное отклонение $\sigma_i(\tau)$ этого числа, где $\sigma_i^2(\tau)$ – дисперсия, $\sigma_i(0) = 0$, $\tau, \tau_0 \in [0, \infty)$, $i = 0, 1, 2, \dots$

Рассмотрим работу пеногенератора с производительностью α пузырьков в единицу времени. Число единиц пенного продукта в каждый момент времени будем считать случайным. Разрушение пузырьков под влиянием какой-либо из причин назовем обслуживанием требований с интенсивностью $\beta = 1/\tau_{cp}$, где τ_{cp} – среднее время «жизни» пузырька до его «гибели». Это позволяет нам рассматривать процесс пеногенерирования как систему массового обслуживания (СМО), в которую поступают требования (пузырьки) на обслуживание (разрушение). После окончания обслуживания требование покидает систему.

Математическая модель. Пусть имеем СМО, на которую поступают требования на обслуживание. Число требований, поступивших в систему, является случайной величиной, распределенной по закону Пуассона:

$$V_k(\tau) = \frac{(\alpha \cdot \tau)^k}{k!} \cdot e^{-\alpha\tau}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

с параметром α – интенсивностью поступления, определяемого как среднее число генерируемых пузырьков в единицу времени.

Требование, поступившее в систему, сразу начинает обслуживаться. Время обслуживания – случайная величина η , распределенная по экспоненциальному закону:

$$P(\eta < \tau) = 1 - e^{-\beta\tau},$$

где β – интенсивность обслуживания, $\beta = 1/\tau_{cp}$.

Обслуженное требование покидает систему СМО.

В такой формулировке математическая модель при использовании методики, предложенной в работе [1], может быть записана системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau} M_i(\tau) + \beta \cdot M_i(\tau) = \alpha, \\ \frac{d}{d\tau} \left[\sigma_i^2(\tau) + M_i^2(\tau) - M_i(\tau) \right] + 2\beta \left[\sigma_i^2(\tau) + M_i^2(\tau) - M_i(\tau) \right] = 2\alpha \cdot M_i(\tau) \end{cases} \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$M_i(0) = i, \quad \sigma_i^2(0) = 0.$$

Ее решение имеет вид:

$$\begin{cases} M_i(\tau) = \frac{\alpha}{\beta} + \left(i - \frac{\alpha}{\beta}\right) \cdot e^{-\beta \cdot \tau}, \\ \sigma_i^2(\tau) = (1 - e^{-\beta \cdot \tau}) \cdot \left(\frac{\alpha}{\beta} + i \cdot e^{-\beta \cdot \tau}\right), \end{cases} \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

Для применения формул (2) необходимо знать значения параметров α и β , которые могут быть определены по статистическим данным. При этом параметр α характеризует скорость образования пузырьков ГДС (пенообразования), параметр β – скорость разрушения пузырьков (пеноразрушения).

Одним из важных параметров, влияющих на качество ГДС, является скорость вращения рабочего органа пеногенератора. На рис. 1 показаны результаты проведенных исследований [1], а именно зависимость изменения числа пузырьков в течение всего времени работы пеногенератора от числа оборотов ротора, для которых определены интервалы значений параметров α_j : 11578...38430 1/мин; 12595...53910 1/мин; 13265...77736 1/мин; 22050...104864 1/мин, соответственно $j = 1750; 2000; 2500; 3000$.

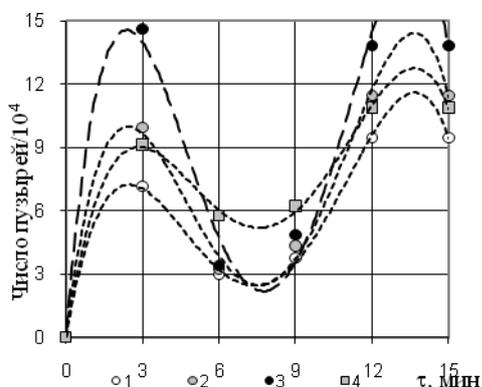


Рис. 1. Изменение числа пузырей в единичном объеме в течение времени τ в зависимости от числа оборотов: 1 – 1750 1/мин; 2 – 2000 1/мин; 3 – 2500 1/мин; 4 – 3000 1/мин

Значения параметра β_j , $j = 1750; 2000; 2500; 3000$, представлены на рис. 2. Устойчивость готовой пены – одна из основной характеристик ее качества и пригодности к использованию. Продолжительность жизни пены зависит от разных факторов: физико-химических свойств вспениваемого раствора (концентрации ПАВ, температуры, pH, вязкости), способа и режима получения [2–4] и др. Однако процессы разрушения пены, начинающиеся практически одновременно с пенообразованием, ухудшают ее качество.

Достижение равновесного состояния между процессами генерирования и разрушения – условие стабильности полученной ГДС. Поэтому критерием устойчивости пены к разрушению является выполнение условия, при котором в единицу времени число генерируемых пузырей пены больше числа разрушенных. Проведенное моделирование [1] позволило выделить режим пеногенерирования со скоростью вращения ротора 2500 об/мин.

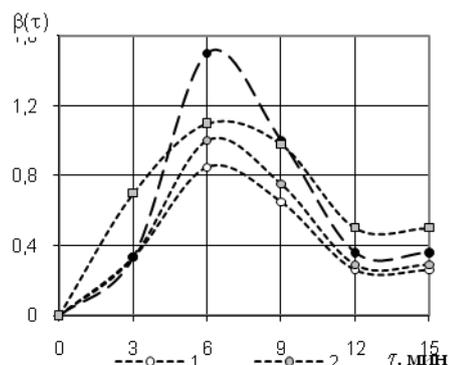


Рис. 2. Изменение параметра $\beta_j(\tau)$ от времени τ .
1 – $j = 1750$; 2 – $j = 2000$; 3 – $j = 2500$; 4 – $j = 3000$

Разрушение пены происходит в результате протекания следующих процессов: истечения жидкости (синерезиса), диффузии газа между пузырьками, разрыва пленок [4–6]. Каждый из них при определенных условиях в отдельности и, особенно в совокупности, может привести к практически мгновенному разрушению. Упомянутая нестабильность уже происходит в процессе взбивания, в том числе срастание пузырьков. В процессе хранения пищевой пены доминирует ее старение [2, 7, 8].

Из отмеченного следует, что динамику разрушения ГДС условно можно разделить на три части: начальная стадия (незначительное разрушение, факторы разрушения оказывают минимальное воздействие на пену, происходит постепенный прирост скорости разрушения), активная стадия (отличается значительным приростом скорости разрушения в плоть до максимальной, наибольшее влияние каждого фактора разрушения, в том числе и в совокупности) и затухающая стадия (уменьшение скорости разрушения). Поскольку устойчивость пены зависит от скорости ее разрушения, то ее характеристикой в нашей модели следует считать параметр $\beta = \beta(\tau)$, являющийся непостоянным и зависящий от времени (см. рис. 2). Определим момент времени τ , начиная с которого происходит нарастание скорости разрушения ГДС.

Анализ значений функции $\beta_j(\tau)$, $j = 1750, 2000, 2500, 3000$, полученных для различных скоростей вращения ротора (см. рис. 2), позволяет считать, что она достигает наибольшего значения в точках, близких к $\tau = 6$ мин, относительно которых сохраняется определенная симметрия. Значения функции $\beta(\tau)$, соответствующей скорости 2500 об/мин, приведены на рис. 3. Использование формулы (2) для случая, когда параметр β постоянен на всем промежутке исследования процесса пенообразования, приводит к слишком грубым приближениям.

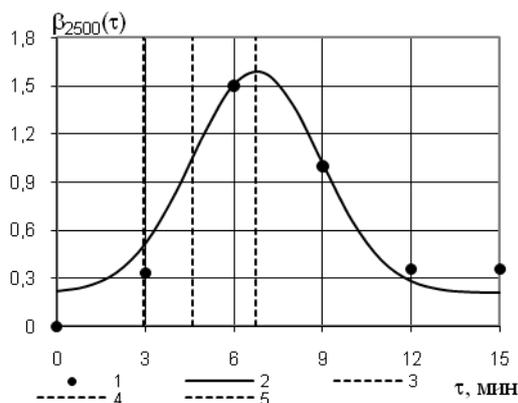


Рис. 3. Изменение функции $\beta(\tau)$ от времени τ : 1 – значения, определенные по экспериментальным данным; 2 – $A = 7,50$, $B = 0,21$, $a = 6,75$, $\sigma = 2,17$; 3, 4, 5 – $\tau_0 = 2,991$, $\tau_1 = 4,580$, $\tau_2 = 6,750$

Из рис. 3 видно, что функция $\beta(\tau)$ может быть приближена функцией $y(\tau) = B + A \cdot e^{-(\tau-a)^2/b}$ для $\tau > 0$ и $y(\tau) = 0$ для $\tau \leq 0$, где A, B, a, b – параметры. В самом деле, «колоколообразный» вид этой функции дает возможность учесть *отмеченные три стадии разрушения пены*, если использовать аппарат дифференциального исчисления. Это позволяет рассмотреть процесс разрушения ГДС с единых позиций. Более того, поскольку функция $y(\tau)$ напоминает плотность нормального распределения $\varphi(\tau)$, которая табулирована, то вычисление значений параметра $\beta(\tau)$ не составит особого труда. Параметры этой функции находятся из статистических данных, определяющих значения $\beta(\tau)$, а сама функция – из таблиц. Приведем функцию $y(\tau)$ к удобному для инженерных расчетов виду и обозначим:

$$\beta(\tau) = B + \frac{A}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-(\tau-a)^2/2\sigma^2}, \quad \tau > 0, \quad (3)$$

где A, B, a, σ – параметры,

$$a \left(\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \right)^{-1} \cdot e^{-(\tau-a)^2/2\sigma^2} = \varphi(\tau).$$

После идентификации процесса разрушения ГДС функцией $\beta(\tau)$, т.е. определения всех параметров функции (3), ее можно подставить в систему дифференциальных уравнений (1) и найти $M_i(\tau)$ и $\sigma_i(\tau)$, $i = 0, 1, 2, \dots$. Можно использовать и другой подход. В каждый фиксированный момент времени $\tau = \tau_j$, $j = 1, 2, \dots, k$, принадлежащий одному из интервалов процессов, определять значение функции $\beta(\tau) = \beta_j - const$ и подставлять их в формулу (2). В силу простоты вычислений отдадим предпочтение последнему подходу.

Проведем исследование функции $\beta(\tau)$ (рис. 4) с целью получения более полной информации о динамике скорости разрушения ГДС в процессе пеногене-

рирования и после такового на основе полученных данных сформулируем ограничения по времени воздействия на обрабатываемую массу. Значения этого параметра получены по экспериментальным данным. Наибольшее значение функции $\beta(\tau)$ равно 1,5 и соответствует $\tau = 6$ мин. Более 6 мин процесс генерирования проводить нецелесообразно, поскольку, судя по всему, именно в этот момент времени и происходит наибольшее суммарное воздействие всех факторов разрушения. Кроме того, необходимо процесс, как уже отмечалось, остановить несколько раньше, не дожидаясь достижения наибольшей скорости разрушения.

Воспользуемся методами дифференциального исчисления для исследования динамики скорости разрушения ГДС (нахождения моментов перехода от одной стадии к другой) по полученной функции $\beta(\tau)$ вида (3).

Вычислим первую производную:

$$\beta'(\tau) = -\frac{A \cdot (\tau - a)}{\sigma^3 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-(\tau-a)^2/2\sigma^2}, \quad (4)$$

которая характеризует скорость изменения (роста или убывания) значений функции. Полагая $\beta'(\tau) = 0$, находим, что наибольшего значения функция $\beta(\tau)$ достигает в точке $\tau = 6,75$, до этого момента функция возрастает, после него убывает, т.е. скорость разрушения пены растет на интервале от 0 до 6,75 и достигает наибольшего значения в момент времени $\tau = 6,75$ мин (напомним, дожидаться которого не рекомендуется). Для дальнейшего рассмотрения возьмем временной интервал $[0, 7]$.

Вычисляя вторую производную функции $\beta(\tau)$, получаем:

$$\beta''(\tau) = \frac{A}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-(\tau-a)^2/2\sigma^2} \cdot \frac{(\tau-a)^2 - \sigma^2}{\sigma^4} \quad (5)$$

и, приравнявая ее (5) к нулю $\beta''(\tau) = 0$, находим, что на интервале $[0, 7]$ первая производная $\beta'(\tau)$ достигает наибольшего значения в точке $\tau = a - \sigma = 4,58$, а функция $\beta(\tau)$ в ней имеет точку перегиба, т.е. на интервале от 0 до 4,58 происходит ускорение разрушения пены и момент времени $\tau = 4,58$ мин (≈ 275 с) характеризуется наиболее скорым разрушением пены, после которого наступает замедление.

Таким образом, наличие точки перегиба на интервале $[0, 7]$ у функции $\beta(\tau)$ есть результат кратковременного равновесия между конкурирующими процессами пенообразования и разрушения, поэтому рекомендуется ограничить процесс пенообразования 4,58 мин (точка равновесия). Более того, разумно остановить пеногенерирование ранее, не дожидаясь момента, когда разрушение пены будет превалировать над ее образованием.

Выясним, какой момент времени определяет начало ускорения разрушения, если считать, что максимум достигается через 4,58 мин. Для этого вычисляем третью производную функции $\beta(\tau)$:

$$\beta'''(\tau) = -\frac{A}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-(\tau-a)^2/2\sigma^2} \cdot \frac{(\tau-a)}{\sigma^6} \cdot ((\tau-a)^2 - 3\sigma^2) \cdot (6)$$

Нули функции $\beta'''(\tau)$ формулы (6) определяют значения параметра τ , для которых характерно состояния монотонности ускорения. Здесь имеем три точки: $\tau_1 = a - \sqrt{3} \cdot \sigma \approx 2,991$, $\tau_2 = 6,750$, $\tau_3 = a + \sqrt{3} \cdot \sigma \approx 10,509$. Поскольку $\tau_3 \notin [0, 7]$, то этот экстремум функции $\beta'''(\tau)$ нас не интересует. Функция $\beta'''(\tau)$ убывает на промежутке от τ_1 до τ_2 , далее начинает возрастать. В моменты времени τ_1 и τ_2 мин ускорение процесса разрушения не изменяется, не растет и не убывает, т.е. наступает некоторый «момент стабильности». На рис. 4. приведены зависимости производных функции $\beta(\tau)$, $\tau \in [0, 7]$.

Объединяя полученные результаты для функции $\beta(\tau) = \beta_{2500}(\tau)$ (см. рис. 4), процесс пеногенерирования целесообразно закончить в промежутке от $2,991 \approx 3$ мин (максимум функции $\beta'''(\tau)$ – момент времени начала нарастания скорости разрушения) до $4,580 \approx 4,6$ мин (максимум функции $\beta'(\tau)$ – момент времени наиболее быстрого разрушения). Экспериментальные данные не противоречат этому результату и указывают на то, что процесс пеногенерирования целесообразно ограничить 3 мин.

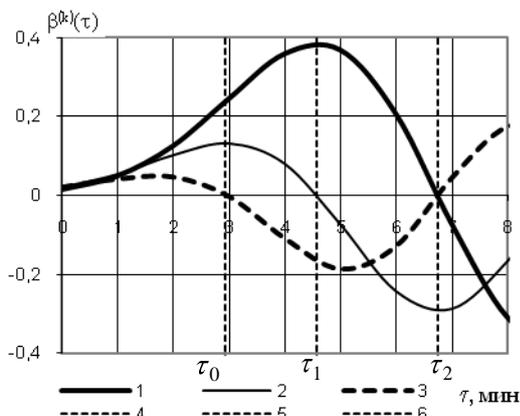


Рис. 4. Производных функции $\beta(\tau)$: 1 – $\beta'(\tau)$; 2 – $\beta''(\tau)$; 3 – $\beta'''(\tau)$; 4, 5, 6 – $\tau_0 = 2,991$, $\tau_1 = 4,580$, $\tau_2 = 6,750$

Аналогичные результаты получены для функций $\beta(\tau) = \beta_{1750}(\tau)$, $\beta(\tau) = \beta_{2000}(\tau)$, $\beta(\tau) = \beta_{3000}(\tau)$. Ошибка расчета составила до 15%. Промежуток времени, в который необходимо закончить пенообразование, следующий: (3,45, 4,91); (3,24, 4,76); (2,36, 4,25) соответственно, поскольку вне этих промежутков скорость разрушения пузырьков превосходит скорость их образования. Для каждого из этих случаев моментом необходимой остановки процесса можно рассматривать $\approx 3,5, 3,3$ и $2,4$ мин соответственно.

Результаты и их обсуждение

Проанализируем процесс пенообразования в течение 3 мин с учетом предложенной методики расче-

та полученных результатов для функции $\beta(\tau)$, в соответствии с которой усредненное значение для $\tau \in [0, 3]$ можно считать равной приблизительно 0,333 1/мин. В результате моделирования (см. рис. 2) при фиксированном значении интенсивности разрушения пузырьков $\beta = \beta_{2500}(3) = 0,333$ 1/мин для любого $\tau \in (0, 7]$ получены следующие интервалы значений интенсивности генерирования пузырьков α : 11578...38430, 12595...53910, 13265...77736 1/мин соответственно. Если варьировать значение параметра α в пределах от 11578...77736 при фиксированном значении параметра $\beta = 0,333$ 1/мин для любого $\tau \in [0, 3]$ при $i = 0$ из формул (2) получим диапазон $(M_i(\tau) - \sigma_i(\tau); M_i(\tau) + \sigma_i(\tau))$ числа пузырьков в единичном объеме пены. Результаты приведены на рис.5.

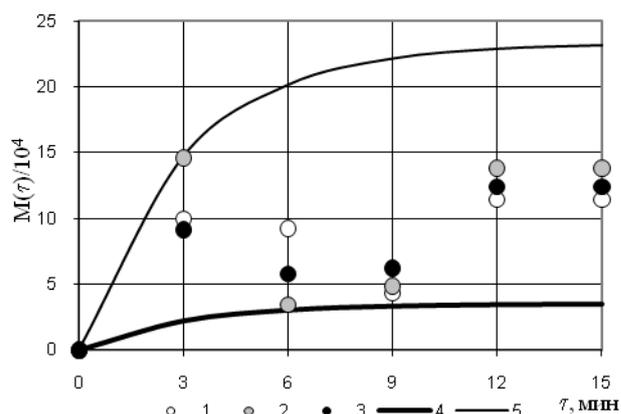


Рис. 5. Зависимость числа пузырей $M(\tau)$ от времени τ при роторно-пульсационной обработке обезжиренного молока, $\beta = 0,333$ 1/мин:

- 1 – экспериментальные данные, 2000 об/мин; 2 – экспериментальные данные, 2500 об/мин; 3 – экспериментальные данные, 3000 об/мин; 4 – $M_0(\tau)$, $\alpha = 11578$ 1/мин; 5 – $M_0(\tau)$, $\alpha = 77736$ 1/мин

Возможные граничные значения среднего числа пузырьков в единичном объеме, близкие к предельным, в данном случае, равны:

$$\underline{M} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} M(\tau) = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{11578}{0,333} \approx 34769 ;$$

$$\overline{M} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} M(\tau) = \frac{77736}{0,333} \approx 233441 ;$$

$$M = \lim_{\tau \rightarrow \infty} M(\tau) = \frac{45501}{0,333} \approx 136638 ,$$

где \underline{M} – предельное наименьшее (ограничивает снизу), \overline{M} – предельное наибольшее (ограничивает сверху), значение M – предельное среднее значение числа пузырьков.

Придавая параметру α значения из указанного диапазона, определяем диапазон значений функции $M_0(\tau)$ (рис. 6), в который с вероятностью, не меньшей 0,95 (с учетом одного σ), будут попадать экспериментальные значения числа пузырей единичного

объема ГДС, полученной при пенообразовании в прочечероторно-пульсационной обработке обезжиренного молока (с первоначальным содержанием массовой доли сухих веществ 9,2%).

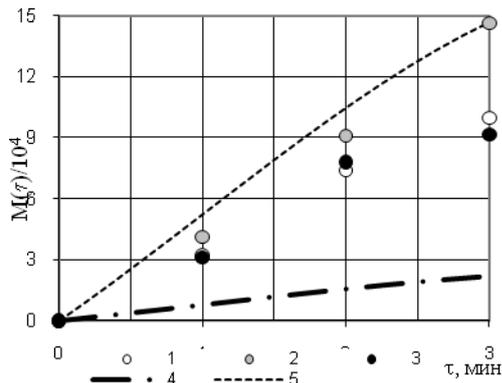


Рис.6. Зависимость от времени τ числа пузырей при роторно-пульсационной обработке обезжиренного молока, $\beta = 0,333$ 1/мин: 1 – экспериментальные данные, 2000 об/мин; 2 – экспериментальные данные, 2500 об/мин; 3 – экспериментальные данные, 3000 об/мин; 4 – $M_0(\tau)$, $\alpha = 11578$ 1/мин; 5 – $M_0(\tau)$, $\alpha = 77736$ 1/мин

Более того, если рассматривать только 3 мин процесса, то в этот диапазон попадут значения $M_0(\tau)$ и при скорости вращения ротора от 1000 до 3000 об/мин. Сравнивая значения каждой отдельной выборки с предельными кривыми, ошибка может достигать 67%, а вероятность попадания значений в указанный диапазон приближается к 1.

Для уменьшения погрешности сузим интервал значений параметра $\alpha = 23875 \dots 77736$ 1/мин, что позволит снизить ошибку расчета практически вдвое, до 38% (рис. 7). Это гарантирует, что, если скорость вращения ротора РПУ будет изменяться в пределах от 2000 до 3000 об/мин, экспериментальные данные попадут в указанный диапазон значений функции $M_0(\tau)$.

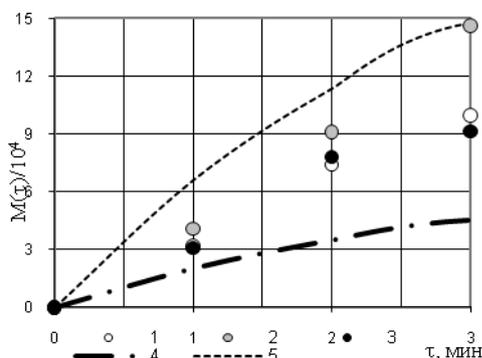


Рис. 7. Зависимость от времени τ числа пузырей при роторно-пульсационной обработке обезжиренного молока, $\beta = 0,333$ 1/мин: 1 – 2000 об/мин; 2 – экспериментальные данные, 2500 об/мин; 3 – экспериментальные данные, 3000 об/мин; 4 – $M_0(\tau)$, $\alpha = 23875$ 1/мин; 5 – $M_0(\tau)$, $\alpha = 77736$ 1/мин

Это условие позволяет провести моделирование процесса пенообразования (для одного исходного

сырья) при продолжительности обработки до трех минут. Для уменьшения погрешности расчета в каждом конкретном случае достаточно параметр начального состояния i считать не постоянным, а зависящим от предыдущего этапа пенообразования, т.е. $i(\tau_{j+1}) = M(\tau_j)$, $\tau_j = 0, 1, 2, 3$ мин, $j = 0, 1, 2$.

Используем зависимость (3), полученную для параметра $\beta(\tau)$. Построим кривую изменения числа пузырей в единичном объеме пены, возникшей при скорости вращения ротора 2500 об./мин (рис. 8). Ошибка расчета в этом случае не превышает 18%.

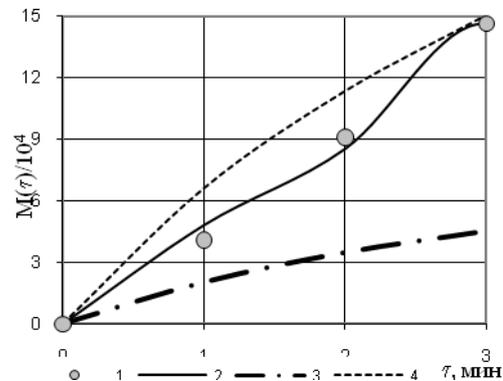


Рис. 8. Зависимость от времени τ числа пузырей при роторно-пульсационной обработке обезжиренного молока, 2500 об/мин: 1 – экспериментальные данные; 2 – $M_0(\tau)$, $\alpha = 49500$ 1/мин, $\beta = \beta(\tau)$; 3, 4 – граничные $M_0(\tau)$, $\alpha = 23875, 77800$ 1/мин, $\beta = 0,333$ 1/мин

При хранении пены отдельные ее пузырьки лопаются, в результате этого пена полностью разрушается. Также при этом происходит изменение их размеров. Одновременно со старением пены уменьшается общий ее объем. Если в процессе старения пены новые пузырьки не добавляются, то достаточно быстро происходит полное разрушение пены. На рис. 9 приведена динамика разрушения пены после 3 мин генерирования в РПУ при 2500 об/мин в зависимости от значений параметра β .

Число пузырей в единичном объеме пены через 3 мин процесса аэрирования составила приблизительно 146324, поэтому в формуле (2) $i(3) = 146324$ и далее убывает в соответствии со значением $M_i(\tau)$. Если в качестве меры устойчивости ГДС рассматривать время $\tau_{M/2}$ разрушения половины объема или половины всех пузырей $M/2 = 146324/2 = 73162$, то $\tau_{M/2} \approx 0,98$ мин (≈ 58 с), если полное разрушение, то $\tau_M \approx 59$ мин (≈ 3542 с). Для граничных кривых, соответствующих среднему значению параметра $\beta = 0,333$ 1/мин, время полного разрушения соответствует 35–39 мин. Несмотря на динамику изменения числа пузырей пены, представленной на рис.9, с увеличением времени τ предельные функции $M(\tau)$ достаточно быстро сходятся к нулю, в отличие от $M_i(\tau)$, зависящей от $\beta = \beta(\tau)$.

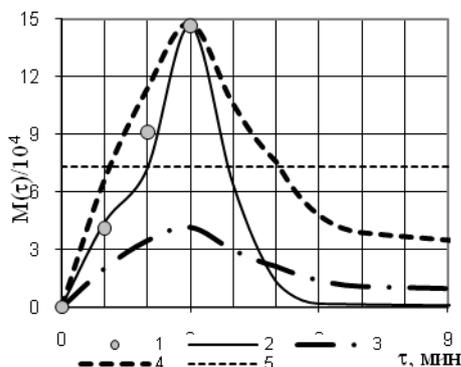


Рис. 9. Зависимость от времени τ числа пузырей при роторно-пульсационной обработке обезжиренного молока, 2500 об/мин: 1 – экспериментальные данные; 2 – $M_i(\tau)$, $0 \leq \tau \leq 3$ $\alpha = 49500$ 1/мин, $i = 0$, $\tau > 3$ $\alpha = 0$ 1/мин, $i = 146324$, $\beta = \beta(\tau)$; 3, 4 – граничные $M_i(\tau)$, $0 \leq \tau \leq 3$ $\alpha = 23875$, 77800 1/мин, $i = 0$, $\tau > 3$ $\alpha = 0$ 1/мин, $i = 41833$, 147599 , $\beta = 0,333$ 1/мин; 5 – $M/2 = 73162$

Построенная стохастическая модель позволила найти математическое ожидание и дисперсию числа пузырьков ГДС в произвольный момент времени, определить рациональные значения скорости вращения ротора РПУ, продолжительности процесса пенообразования, описать устойчивость полученной пены. Кроме того, с помощью использования физического смысла параметра обслуживания и его математического аналога, (как функции времени) описан процесс разрушения ГДС от начала до момента целесообразной остановки процесса пенообразования. Разработана методика определения значений параметров этой модели.

Список литературы

- 1.Иванова, С.А. Стохастические модели технологических процессов переработки дисперсных систем обезжиренного молока: монография / С.А. Иванова. – Кемерово: КемТИПП, 2010. – 124 с.
- 2.Dickinson, E. Food Emulsions and Foams / E. Dickinson. – London: the Royal Society of Chemistry, 1987. – 290 p.
- 3.Кругляков, П.М. Пена и пенные пленки /П.М. Кругляков, Д.Р. Ексерова. – М.: Химия, 1990. – 432 с.
- 4.Тихомиров, В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения / В.К. Тихомиров. – М.: Химия, 1983. – 264 с.
- 5.Гельфман, М.И. Коллоидная химия / М.И. Гельфман, О.В. Ковалевич, В.П. Юстратов. – СПб.: Изд-во «Лань», 2003. – 336 с.
- 6.Канн, К.Б. Капиллярная гидродинамика пен / К.Б. Канн. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1989. – 167 с.
- 7.Walstra, P. Dairy science and technology / P. Walstra, Jan T.M. Wouters, T.J. Geurts. – Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – 768 p.
- 8.Просеков, А.Ю. Теория и практика формирования молочных пенообразных систем: монография / А.Ю. Просеков, Т.Л. Остроумова. – М.: Изд-во РАСХН, 2005. – 216 с.

ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.
Тел./факс: (3842)73-40-40
E-mail: office@kemtipp.ru

SUMMARY

S.A. Ivanova, M.V. Bakanov

INVESTIGATION OF MILK-PROTEIN GAS-LIQUID SYSTEM STABILITY WITH STOCHASTIC METHODS

The stochastic model allowing to study the process of gas-liquid disperse system destruction and formation has been created. The particularity of this model is the fact that the foaming process is characterized by mathematical expectation and dispersion of the bubble numbers and the destruction process by a function being of one of the parameters of the mathematical expectation.

Aerated milk products, stability, stochastic model, mathematical expectation, dispersion.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia
Phone/Fax: +7(3842)73-40-40
E-mail: office@kemtipp.ru

