

**С.А. Иванова, В.А. Павский****ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕНОГЕНЕРИРОВАНИЯ  
ВТОРИЧНОГО МОЛОЧНОГО СЫРЬЯ\***

Рассматривается процесс пеногенерирования обезжиренного молока. В качестве основы вспененного продукта используется его концентрат. Изучено влияние технологических параметров процесса пеногенерирования роторно-пульсационной установкой на качество готового продукта. Разработана стохастическая модель для оценки эффективности процесса пеногенерирования.

Вторичное молочное сырье, газожидкостная дисперсная система, пуассоновский процесс, стохастическая модель.

Вторичное молочное сырье (сыворотка, обезжиренное молоко, пахта) может использоваться как частично (извлечение компонентов по отдельности лактозы, белков и т.д., для последующего использования в производстве других продуктов питания) [1, 2], так и комплексно (разработаны и продолжают разрабатываться рецептуры продуктов на основе вторичного молочного сырья) [2, 3]. Производство молочных десертов занимает не последнее место в этих направлениях, а использование пеногенерирования в технологической схеме позволяет улучшить вкусовые качества, разнообразить перечень продуктов и является относительно новым направлением.

Для получения пены (газожидкостной дисперсной системы – ГДС) необходимо наличие в растворе определенной концентрации поверхностно-активных веществ (ПАВ), в качестве таковых могут выступать белки. Биологической жидкостью, богатой высокомолекулярными пенообразователями, является молоко и его составляющие, в частности обезжиренное молоко. По своему составу оно соответствует молоку практически полностью, за исключением липидной составляющей. Для улучшения пенообразующего свойства раствора необходимо увеличить концентрацию ПАВ (белков) [4].

Из методов получения белкового концентрата из молочного сырья (МБК) в последнее время предпочтение отдается мембранным методам, в частности ультрафильтрации (УФ), которые позволяют выделить белки, сохранив их нативные свойства, а также сэкономить энергию. У поверхности мембраны в процессе концентрирования образуется устойчивый слой (явление концентрационной поляризации), в результате снижается проницаемость и селективность мембраны, а следовательно и производительность оборудования. На кафедре «Процессы и аппараты пищевых производств» Кемеровского технологического института пищевой промышленности разработаны конструкции мембранных аппаратов [5, 6], которые позволяют отводить поверхностную часть этого слоя, содержащего повышенную концентрацию

задерживаемых веществ, и тем самым интенсифицировать процесс концентрирования.

Кроме того, целесообразно провести предварительную подготовку обрабатываемого сырья с целью укрупнений частиц белка, например кислотной коагуляцией [7]. Для этого либо в раствор обезжиренного молока вносится готовый раствор кислоты, например HCl [8], либо кислота образуется при гидролизе химического вещества, например глюконо- $\delta$ -лактона (E575) [9, 10], либо при ферментном разложении лактозы до молочной кислоты, например внесением молочнокислых заквасок [11].

Накопление кислоты (молочной, глюконовой и т.д.) в рабочем растворе приводит к снижению уровня активной кислотности pH. Для коагуляции белков в молоке необходимо снижение, как правило, уровня pH с 6,4 до 4,8–4,6 [12].

Проведенные экспериментальные исследования [13] состояли в изучении дозы и вида закваски молочнокислых бактерий, использовались мезофильные и термофильные культуры прямого внесения типа FD-DVS CH-N-19, EZAL U-D MYE 96. Для ферментации молока закваски вносили в молоко в количестве 3–7 %, выдерживали при заданной температуре и контролировали значения pH и диаметр мицелл казеина. Температурные параметры ферментации молока микроорганизмами выбирали с учетом существующих рекомендаций, комбинирование заквасок проводили с целью интенсификации процесса и для обеспечения возможности регулирования состава и свойств образующихся белковых сгустков.

Мезофильные культуры не являются интенсивными кислотообразователями, и их использование будет увеличивать продолжительность подготовительного этапа. Термофильные культуры являются интенсивными кислотообразователями, поэтому возможно использование этих культур как в чистом виде, так и в смеси с мезофильными. В последнем случае удастся обеспечить получение заданных физико-химических показателей рабочего раствора через 8–9 ч, при этом достаточно внесения дозы закваски 5 %. Кроме того, наличие мезофильных культур в

\* Работа поддержана РФФИ, грант № 09-07-00185-а.

дальнейшем способствует интенсификации процесса мембранной обработки.

Сквашенное обезжиренное молоко при температуре  $50 \pm 5$  °С под давлением 0,15 МПа поступает в экспериментальную установку со скоростью потока раствора 0,122 м/с, основным элементом которой является ультрафильтрационный мембранный аппарат специальной конструкции.

Критериями оценки качества полученной газожидкостной дисперсной системы (ГДС) являются кратность, дисперсность и устойчивость [14], которые определяют «воздушность» (содержание значительного процента воздуха или газа) и «неразрушаемость» (разброс по размерам пузырьков незначительный).

Качество готовой ГДС зависит от сырья, оборудования и параметров процесса пеногенерирования. Ранее проведенные

сравнительные исследования [15, 16] способов получения молочных газожидкостных дисперсных систем взбиванием, диспергированием с принудительной подачей газа и интенсивным гидромеханическим воздействием в многофункциональной роторно-пульсационной установке (РПУ) показали, что в качестве пеногенератора возможно использовать роторно-пульсационное устройство [16] с объемом рабочей камеры  $0,018 \text{ м}^3$ , при числе оборотов ротора 2500 в минуту; коэффициенте заполнения 0,3; зазоре между ротором и статором 0,1 мм; температуре  $13 \pm 2$  °С и времени обработки 3 мин. Пеногенерирование предварительно охлажденных обезжиренного молока и его концентрата проводили при этих же условиях. Результаты проведенных исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Состав и физико-химические свойства обезжиренного молока и его УФ-концентрата

Образец	Массовая доля сухих веществ, %	Массовая доля белка, %	Плотность пены, $\text{кг/м}^3$	Кратность пены, %	Устойчивость, мин
Обезжиренное молоко	9,2	3,4	320	285	65
УФ-концентрат	12,4	6,8	258	385	110

Лучшие физико-химические свойства и пенообразующая способность концентрата обезжиренного молока позволяют рассматривать именно его в качестве сырья продуктов на молочной основе. Проведенные нами исследования позволили изучить влияние на качество готового аэрированного продукта продолжительности обработки, частоты вращения ротора и температуры раствора. В итоге было установлено, что для получения пены с лучшими качествами процесс аэрирования концентрата обезжиренного молока лучше проводить при температуре  $24 \pm 2$  °С в течение 3 мин при скорости вращения ротора 2500 об/мин [17].

Под устойчивостью пены понимают временной период от момента производства до полного или частичного разрушения. Каждый процесс пеногенерирования одновременно состоит из собственно пенообразования и разрушения. Разрушение каждого из пузырьков пены может происходить по разным причинам (внешние воздействия, истечение жидкости из пенных пленок, диффузия газа из одних пузырьков в другие, разрыв отдельных пленок внутри пены). В целом на процесс пеногенерирования оказывает влияние фактор случайности, поэтому анализ эффективности работы пеногенератора можно провести на основе методов теории случайных процессов, а за меру стабильности ГДС рассматривать распределение числа единиц (пузырьков) пенного слоя во времени. В качестве показателя эффективности

функционирования пеногенератора используем  $M_i(\tau)$  – математическое ожидание числа единиц (пузырьков) пены, составляющих готовый продукт в момент времени  $\tau$  при условии, что в начальный момент времени  $\tau_0$  их число было равно  $i$  и  $\sigma_i(\tau)$  – среднее квадратичное отклонение от этого числа, при  $\sigma_i(0) = 0$ ,  $\tau, \tau_0 \in [0, \infty)$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots$ ,  $\tau_{cp}$  – среднее время «жизни» пузырька до его «гибели».

Рассмотрим работу пеногенератора с производительностью  $\alpha$  пузырьков в единицу времени. Число единиц ГДС готового продукта в каждый момент времени будем считать случайным. Разрушение пузырьков под действием какой-либо из причин назовем обслуживанием требований. Это позволяет нам рассматривать процесс пеногенерирования как систему массового обслуживания  $S$  [18], в которую поступают требования (пузырьки) на обслуживание (разрушение). После окончания обслуживания требование покидает систему.

Пусть имеем систему  $S$ , на которую поступают требования на обслуживание. Число требований, поступивших в систему, является случайной величиной  $\xi$ , распределенной по закону Пуассона с параметром  $\alpha$  – интенсивностью поступления.

Требование, поступившее в систему, сразу начинает обслуживаться. Время обслуживания – случайная величина  $\eta$ , распределенная по экспоненциальному закону с параметром

$\beta = 1/\tau_{cp}$  – интенсивностью обслуживания. Обслуженное требование покидает систему  $S$ .

Требуется вычислить  $P_k(\tau)$  – вероятность того, что в момент времени  $\tau \in [0, \infty)$  в системе находится  $k$  требований,  $k = 0, 1, \dots$ . Для вычисления вероятностей составлена система дифференциальных уравнений с начальными условиями  $P_k(0) = 0, P_i(0) = 1, i \neq k, i = 0, 1, 2, \dots$  [19, 20]. Из системы дифференциальных уравнений для вероятностей с использованием производящей функции [18–20] получена система из двух обыкновенных дифференциальных уравнений для  $M_i(\tau)$  и  $D_i(\tau)$

, где  $D_i(\tau) = \sigma_i^2(\tau)$ ,

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

аналитическое решение [20] которой с учетом заданных начальных условий

$$M_i(0) = i, D_i(0) = 0$$

позволило определить функциональные зависимости математического ожидания и дисперсии числа пузырьков пены в любой заданный момент времени. Для проверки адекватности предложенной модели использовали экспериментальные данные, полученные при пеногенерировании УФ-концентрата обезжиренного молока на роторно-пульсационной установке при ранее определенных (см. табл. 1) рациональных значениях технологических параметров процесса пеногенерирования (табл. 2). Проведенный анализ теоретических и экспериментальных данных показал достоверность 86–94 % (в предположении, что процесс пуассоновский).

Таблица 2

Изменение числа пузырьков ГДС от времени  $\tau$  при РПУ-обработке обезжиренного молока

$\tau$ , мин	3	6	9	12	15
$\xi(\tau)$ *	23 503	25 408	25 813	52 156	52 156
$M_0(\tau)$	23 517	25 406	25 772	52 214	52 219
$M_0(\tau) \pm \sigma_0(\tau)$	23 360–23 645	25 250–25 565	25 652–25 973	51 930–52 381	51 928–52 383

\*  $\xi(\tau)$  – число пузырьков в единице объема ГДС, полученной при числе оборотов ротора 2500 1/мин.

Предложенная стохастическая модель позволяет не только проанализировать эффективность работы пеногенератора, но и выработать рекомендации по организации его работы. В частности, зная величину среднего диаметра пузырьков в получаемой ГДС и наибольшее число пузырьков, получаемое из единичного объема исходного раствора, можно определить необходимый объем емкости, в которой производится пеногенерирование, или решить обратную задачу, определить наибольший объем исходного раствора, допустимый для пенообразования в оборудовании фиксированной конструкции.

Результаты проведенных исследований позволяют интенсифицировать процесс концентрирования обезжиренного молока на мембранном оборудовании, организовать процесс получения аэрированных (пенообразных) продуктов заданного качества и сформулировать рекомендации по созданию товаров на основе вторичного молочного сырья с использованием в технологической схеме пеногенерирования. На кафедре «Технология молока и молочных продуктов» Кемеровского технологического института пищевой промышленности разработана техническая документация на аэрированные молочные продукты с добавлением сока клюквы, клубники, брусники и др. (ТУ 9224-054-02068315-06), аналогичные исследования проводятся и в других вузах [21, 3, 15].

## Список литературы

1. Храмцов, А.Г. Справочник технолога молочного производства. Технология и рецептуры. Т. 5: Продукты из обезжиренного молока, пахты и молочной сыворотки / А.Г. Храмцов, С.В. Василисин. – СПб.: ГИОРД, 2004. – 576 с.
2. Храмцов, А.Г. Безотходная переработка молочного сырья / А.Г. Храмцов, П.Г. Нестеренко. – М.: КолосС, 2008. – 200 с.
3. Мельникова, Е.И. Инновационные технологии использования молочной сыворотки в производстве десертных продуктов / Е.И. Мельникова, Л.В. Голубева, Е.Б. Станиславская // *Хранение и переработка сельхозсырья*. – 2010. – № 1. – С. 50–52.
4. Augustin, M.A. Skim milk powders with enhanced foaming and steam-frothing properties / M.A. Augustin, P.T. Clarke // *Dairy Sci. Technol.* – 2008. – V. 88. – P. 149–161.
5. Патент № 2168353 В 01 J 8/00, В 01 J 9/00. Способ мембранного концентрирования / Лобасенко Б.А., Павский В.А., Иванова С.А., Лобасенко Р.Б.; заявитель и патентообладатель Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – 20000105933/12; заявл. 10.03.2000; опубл. 10.06.2001, Бюл. № 16.
6. Лобасенко, Б.А. Мембранный аппарат, использующий отвод диффузионного слоя с поверхности мембраны / Б.А. Лобасенко, С.А. Иванова // *Хранение и переработка сельхозсырья*. – 2001. – № 7. – С. 57–59.
7. Горбатова, К.К. Физико-химические и биохимические основы производства молочных продуктов. – СПб.: ГИОРД, 2004. – 352 с.
8. Phadungath, C. The mechanism and properties of acid-coagulated milk gels // *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 2005. – V. 27(2). – P. 433–448.
9. Lucey, J.A. Acid coagulation of milk / J.A. Lucey, H. Singh // *Advanced dairy chemistry: proteins*, 2<sup>nd</sup> edn. – Gaithersburg, 2003. – V. 2. – P. 997–1021.
10. Ramachandran, S. Gluconic acid: properties, applications and microbial production / S. Ramachandran, P. Fontanille, A. Pandey, C. Larroche // *Food Technol. Biotechnol.* – 2006. – V. 44 (2). – P. 185–195.
11. Penna, A.L.B. High hydrostatic pressure processing on microstructure of probiotic low-fat yogurt / A.L.B. Penna, Subbarao-Gurram, G.V. Barbosa-Canovas // *Food Research International*. – 2007. – V. 40. – P. 510–519.
12. Горбатова, К.К. Биохимия молока и молочных продуктов / К.К. Горбатова. – СПб.: ГИОРД, 2004. – 320 с.
13. Литвинов, М.С. Исследование закономерностей концентрирования белков молока ультрафильтрацией и разработка технологии белковых молочных продуктов: дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2008. – 135 с.
14. Просеков, А.Ю. Теория и практика формирования молочных пенообразных систем: монография / А.Ю. Просеков, Т.Л. Остроумова. – М.: Издательство РАСХН, 2005. – 216 с.
15. Просеков, А.Ю. Влияние технических характеристик роторно-пульсационного аппарата на структуру взбитого продукта / А.Ю. Просеков, Е.В. Строева, Т.Л. Остроумова // *Хранение и переработка сельхозсырья*. – 2005. – № 5. – С. 61–63.
16. Баканова, О.А. Исследование и разработка технологии пенообразных молочно-растительных продуктов: дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2006. – 128 с.
17. Иванова, С.А. Пеногенерирование молочного сырья / С.А. Иванова // *Молочная промышленность*. – 2010. – № 1. – С. 59–60.
18. Khoroshevsky, V.G. Calculating the efficiency indices of distributed computer system functioning / V.G. Khoroshevsky, V.A. Pavsky // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2008. – V. 44. – № 2. – P. 95–104.
19. Юстратов, В.П. Математическое моделирование электродиализного обессоливания на основе стохастической модели / В.П. Юстратов, В.А. Павский, Т.А. Краснова, С.А. Иванова // *Теоретические основы химической технологии*. – 2005. – Т. 39. – № 3. – С. 278–281.
20. Хорошевский, В.Г. Методика расчета показателей эффективности функционирования вычислительных систем / В.Г. Хорошевский, В.А. Павский, К.В. Павский // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. – 2008. – № 2. – С. 47–55.
21. Голубева, Л.В. Растительное сырье в молочносодержащих десертных продуктах / Л.В. Голубева, Е.И. Мельникова, Е.Б. Терешкова // *Молочная промышленность*. – 2006. – № 2. – С. 56–57.

ГОУ ВПО «Кемеровский технологический институт  
пищевой промышленности»,  
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.  
Тел. (3842) 73-42-00

## SUMMARY

S.A. Ivanova, V.A. Pavsky

### Research of foaming processes of secondary dairy raw materials

The foaming process of skim milk has been investigated. The use of a skim milk concentrate as the basis for foamed product has been proved. The influence of technological parameters of foaming process, carried out by the rotary pulsation device, on the ready product quality has been studied. The stochastic model for the estimation of foaming process efficiency has been developed.

Secondary dairy raw materials, gas-liquid disperse system, the Poisson process, stochastic model.