

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕНООБРАЗОВАНИЯ В АППАРАТЕ ЛАБИРИНТНОГО ТИПА

В. Я. Борщев¹, Н. В. Амелина², Т. А. Сухорукова¹

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (1); kvidep@cen.tstu.ru; ООО «Снектр», г. Тамбов (2)*

Ключевые слова: аппарат для вспенивания; пенообразование; пенорезина; радиус пузырька пены.

Аннотация: Проведено исследование процесса пенообразования в аппарате лабиринтного типа, который является перспективной конструкцией для вспенивания латексной пенорезины. В процессе исследования учтены особенности реального производства, в котором такие показатели, как поверхностное натяжение и перепад давления в аппарате, являются определяющими при получении пены. При разработке математического описания механизма пенообразования в аппарате лабиринтного типа сделаны допущения о постоянстве геометрических параметров ротора аппарата и плотности латексной системы. Проведено уточнение уравнения для расчета радиуса воздушного пузырька пены с учетом поверхностного натяжения и перепада давления. Полученное уравнение позволяет определить размер воздушного пузырька в латексной пене в зависимости от физико-механических свойств латексной системы, конструктивных и режимных параметров аппарата для вспенивания.

Пенорезина, получаемая, как правило, из натурального латекса, представляет собой высокопористый материал с низкой плотностью и достаточной твердостью [1]. Она широко используется для изготовления сидений автомобилей, в мебельной промышленности, в качестве подложки ковров и т.д. Низкая плотность, а также хорошие физико-механические и гигиенические свойства позволяют пенорезине успешно конкурировать с пенополиуританом. Пенорезину изготавливают вспениванием латексной смеси с последующей вулканизацией полученной пены [1]. Вспенивание латексной смеси осуществляют преимущественно механическим способом. Среди механических устройств наиболее перспективной конструкцией является аппарат для вспенивания лабиринтного типа.

В настоящее время известно достаточно большое число работ, посвященных экспериментальному исследованию процесса пенообразования в данном аппарате. В то же время работ теоретического характера чрезвычайно мало. Поэтому в настоящей работе предпринята попытка разработки математического описания процесса пенообразования в аппарате для вспенивания лабиринтного типа.

В работе [2] дано представление о механизме пенообразования в аппарате для вспенивания лабиринтного типа. При этом установлено, что сложность процесса пенообразования определяется влиянием многочисленных физико-механических, физико-химических и других факторов. Вследствие большого чис-

ла переменных факторов математическое описание процесса пенообразования традиционными методами математического анализа связано с большими трудностями [1].

В результате исследования процесса пенообразования латексной смеси в аппарате лабиринтного типа получили уравнение для расчета размера воздушных пузырьков в пене [1]

$$r = 1,045 \sqrt[3]{\frac{3Q(k-1)\mu(\pi d_{cp} + 2t - tz)}{z d_{cp} a_1 n \rho (1 - 1,5b_1 t) \left(\pi d_{cp} t - \frac{zt^2}{2} \sqrt{3} \right)}}$$

где Q – расход латексной смеси при вспенивании, м³/с; k – кратность пены; μ – динамический коэффициент вязкости латексной смеси, Па·с; d_{cp} – средний наружный диаметр ротора аппарата для вспенивания лабиринтного типа, м; t – ширина зуба винтовой нарезки ротора, м; z – число заходов винтовой нарезки ротора и втулки; a_1 , b_1 – коэффициенты, с⁻¹; n – число оборотов ротора, об/мин; ρ – плотность латексной системы, кг/м³.

Полученное уравнение для расчета размера воздушных пузырьков в пене соответствует условиям постоянства перепада давления в аппарате для вспенивания и значения коэффициента поверхностного натяжения латексной системы. В реальном производстве эти показатели, особенно поверхностное натяжение [3, 4], являются определяющими при получении латексной пенорезины.

Механизм образования воздушных пузырьков в латексной пене характеризуется достаточной сложностью. Интенсивность роста и размер воздушных пузырьков в пене определяется многочисленными факторами, в частности гидродинамическим, геометрией рабочей поверхности аппарата для вспенивания и режимными параметрами его работы [2]. При работе аппарата для вспенивания происходит как образование, так и разрушение пузырьков в результате их объединения, обусловленного разностью диаметров и внутренних давлений. С учетом этих факторов уравнения для определения числа образующихся и разрушающихся воздушных пузырьков в аппарате для вспенивания можно представить в следующем виде

$$\frac{dN_1}{d\tau} = a z \frac{Re}{\sigma},$$

где N_1 – число образующихся пузырьков; Re – число Рейнольдса в проточной части вспенивателя; σ – коэффициент поверхностного натяжения латексной системы, Н/м; τ – время пребывания латексной системы в аппарате, с; a – коэффициент, Н/(с·м).

После интегрирования получим выражение для расчета числа образующихся пузырьков

$$N_1 = a \frac{Re}{\sigma} \tau z. \quad (1)$$

Число разрушающихся воздушных пузырьков в пене определяется зависимостью

$$\frac{dN_2}{d\tau} = b \frac{\tau}{\Delta p},$$

где N_2 – число разрушающихся пузырьков; Δp – перепад давления в аппарате, Н/м²; b – коэффициент, Н/(с²·м²).

После интегрирования получим выражение для расчета числа разрушающихся пузырьков

$$N_2 = \frac{1}{2} b \frac{\tau^2}{\Delta p}. \quad (2)$$

С учетом выражений (1) и (2) число пузырьков на выходе из вспенивателя будет равно

$$N = N_1 - N_2 = a \frac{\text{Re}}{\sigma} \tau z - \frac{1}{2} b \frac{\tau^2}{\Delta p} = \tau \left[a z \frac{\text{Re}}{\sigma} - \frac{1}{2} b \frac{\tau}{\Delta p} \right]. \quad (3)$$

В свою очередь для расчета числа воздушных пузырьков, образующихся в аппарате для вспенивания лабиринтного типа, в работе [1] предложена следующая зависимость

$$N = \frac{3V_{\text{л}}(k-1)}{4\pi r^3}, \quad (4)$$

где $V_{\text{л}}$ – объем латексной системы, м³; r – радиус воздушного пузырька в пене, м.

В результате совместного решения уравнений (3) и (4) получена формула для расчета радиуса воздушного пузырька

$$r = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \frac{V_{\text{л}}(k-1)}{\tau \left[a z \frac{\text{Re}}{\sigma} - \frac{1}{2} b \frac{\tau}{\Delta p} \right]}}. \quad (5)$$

Число Рейнольдса определяется по зависимости

$$\text{Re} = \frac{v 4R_{\Gamma}}{v},$$

где R_{Γ} – гидравлический радиус, определяемый по формуле; v – окружная скорость ротора, м/с; v – кинематический коэффициент вязкости латексной смеси, м²/с.

$$R_{\Gamma} = \frac{F}{\Pi},$$

где Π – смоченный периметр, м; F – проходное сечение лабиринтного аппарата для вспенивания, м².

С учетом выражения для гидравлического радиуса получим выражение для расчета числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{4vF}{\Pi v},$$

Проходное сечение лабиринтного аппарата для вспенивания определяется по формуле [1]

$$F = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) - 2 f z,$$

где D_1 , D_2 – диаметр впадин втулки и ротора соответственно, м; f – площадь сечения зуба винтовой нарезки ротора, м².

Площадь сечения зуба винтовой нарезки ротора [1]

$$f = \frac{\sqrt{3}}{4} t^2.$$

Смоченный периметр и проходное сечение аппарата для вспенивания лабиринтного типа определяются по следующим зависимостям [2]

$$\Pi = 2(\pi d_{\text{cp}} + 2t - z t),$$

$$F = \pi d_{\text{cp}} t - \frac{z t^2}{2} \sqrt{3}.$$

Подставляя полученные зависимости для смоченного периметра Π и проходного сечения аппарата F , получим выражение для расчета числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{4\pi d_{\text{cp}} n \left(\pi d_{\text{cp}} t - \frac{z t^2}{2} \sqrt{3} \right)}{\nu 60 \cdot 2(\pi d_{\text{cp}} + 2t - z t)}.$$

Подставив значение числа Рейнольдса в формулу (5), получим зависимость для расчета радиуса воздушного пузырька

$$r = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} Q(k-1) \left(\frac{4\pi a z d_{\text{cp}} n \left(\pi d_{\text{cp}} t - \frac{z t^2}{2} \sqrt{3} \right)}{\sigma \nu 60 \cdot 2(\pi d_{\text{cp}} + 2t - z t)} - \frac{1}{2} b \frac{\tau}{\Delta p} \right)^{-1}}. \quad (6)$$

Полученное уравнение позволяет рассчитать средний размер воздушных пузырьков в пене в зависимости от технологических параметров устройства и условий работы лабиринтного аппарата для вспенивания.

Перепад давления в аппарате для вспенивания можно определить по зависимости [5]

$$\Delta p = \frac{k_1 z l \rho}{k \pi d_{\text{cp}}} \left(\frac{\pi d_{\text{cp}} n}{120} - \frac{Q}{F} \text{tg } \alpha \right)^2, \quad (7)$$

где k_1 – коэффициент напора; l – длина ротора, м; α – угол винтовой нарезки ротора, град.

Упростим уравнение (6) для конкретной конструкции лабиринтного вспенивателя, то есть примем постоянными средний наружный диаметр ротора $d_{\text{cp}} = \text{const}$, ширину зуба ротора $t = \text{const}$, длину ротора $l = \text{const}$, плотность латексной системы $\rho = \text{const}$.

С этой целью подставим зависимость (7) в формулу (6) и введем следующие обозначения:

$$\frac{4\pi d_{\text{cp}} z n \left(\pi d_{\text{cp}} t - \frac{z t^2}{2} \sqrt{3} \right)}{60 \cdot 2(\pi d_{\text{cp}} + 2t - z t)} = A;$$

$$\frac{\pi d_{\text{cp}}}{2k_1 z l \rho} = B.$$

В результате получим окончательную формулу для расчета радиуса воздушного пузырька пены

$$r = 0,63 \sqrt[3]{Q(k-1) \left(\frac{a A}{\sigma v} - \frac{B k b \tau}{(\pi d_{cp} n / 120 - \operatorname{tg} \alpha Q / F)^2} \right)^{-1}} \quad (8)$$

Уравнение (8) позволяет определить размер воздушного пузырька в пене в зависимости от физико-механических свойств латексной системы, конструктивных и регламентных параметров аппарата для вспенивания.

Время пребывания латексной системы в аппарате лабиринтного типа определяется уравнением [5]

$$\tau = \frac{l}{\pi d_{cp} n \cos \alpha / 120}.$$

С учетом полученной формулы для времени пребывания уравнение (8) для расчета радиуса пузырька преобразуется к виду

$$r = 0,63 \sqrt[3]{Q(k-1) \left(\frac{a A}{\sigma v} - \frac{B k b 120 l}{\pi d_{cp} n \cos \alpha (\pi d_{cp} n / 120 - \operatorname{tg} \alpha Q / F)^2} \right)^{-1}}.$$

Таким образом, уточненное уравнение позволяет рассчитать радиус пузырька пены с учетом основных характеристик, определяющих процесс пенообразования в аппарате для вспенивания лабиринтного типа: поверхностного натяжения и перепада давления.

Список литературы

1. Расчет и проектирование процесса и оборудования для производства латексной пенорезины / А. С. Клинков [и др.] – М. : Спектр, 2012. – 96 с.
2. Кульбашный, А. С. Разработка конструкции вспенивателя латексной смеси и методика его расчета / А. С. Кульбашный, А. С. Клинков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 643 – 648.
3. Тихомиров, В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения / В. К. Тихомиров – М. : Химия. – 1975. – 264 с.
4. Изучение свойств латексных пен / Е. А. Горелик [и др.] // Проблемы синтеза, исследования свойств и переработки латексов / под ред. В. В. Черной и М. И. Шепелева. – М., 1971. – С. 123.
5. Голубев, А. И. Лабиринтные насосы для химической промышленности / А. И. Голубев. – М. : МАШГИЗ, 1961. – 75с.

Modeling of the Foam Formation Process in the Labyrinth Type Device

V. Ya. Borshchev¹, N. V. Amelina², T. A. Sukhorukova¹

Department «Technological Processes, Devices and Technosphere Safety»,
TSTU (1); ООО «Спектр», Tambov (2)

Keywords: foam rubber; foam formation; foam formation device; foam bubble radius.

Abstract: A promising device for foam formation is a labyrinth-type apparatus. The study of the foaming process in the labyrinth type apparatus has been made in this work. In real production the surface tension and pressure drop in the device are decisive for foam formation. These peculiarities have been taken into account in the research process. In the development of the mathematical description of the foam formation mechanism in the labyrinth-type apparatus the assumptions about the constancy of the rotor's geometric parameters and the latex system density have been made. The refined equation for calculation of the foam bubble radius was obtained. It takes into account surface tension and pressure drop. The obtained equation allows us to calculate the size of the air bubble in the foam, depending on the physical-mechanical characteristics of the latex system, structural and regulatory parameters of the foam formation device.

References

1. Klinkov A.S., Kul'bashnyi A.S., Sokolov M.V., Odnol'ko V.G. *Raschet i proektirovanie protsessa i oborudovaniya dlya proizvodstva lateksnoi penoreziny* (Calculation and design of process and equipment for the production of latex foam), Moscow: Spekr, 2012, 96 p.
2. Kul'bashnyi A.S., Klinkov A.S. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 643-648.
3. Tikhomirov V.K. *Peny. Teoriya i praktika ikh polucheniya i razrusheniya* (Foam. Theory and Practice of Their Production and Destruction), Moscow: Khimiya, 1975, 264 p.
4. Gorelik E.A. *Problemy sinteza, issledovaniya svoystv i pererabotki lateksov* (Problems of synthesis, studies of the properties and processing of latex), Moscow, 1971, p. 123.
5. Golubev A.I. *Labirintnye nasosy dlya khimicheskoi promyshlennosti* (Labyrinth pumps for the chemical industry), Moscow: MASHGIZ, 1961, 75 p.

Modellierung des Prozesses der Schaumbildung im Apparat des Labyrinthtyps

Zusammenfassung: Eine perspektivische Konstruktion für das Aufschäumen des Latexschaumgummis ist der Apparat des Labyrinthtyps. In dieser Arbeit ist die Forschung des Prozesses der Schaumbildung im Apparat des Labyrinthtyps durchgeführt. Im Laufe der Forschung sind die Besonderheiten der realen Produktion berücksichtigt, in der solche Kennziffern wie die oberflächliche Spannung und das Gefälle des Drucks im Apparat beim Erhalten des Schaums bestimmend sind. Bei der Entwicklung der mathematischen Beschreibung des Mechanismus der Schaumbildung im Apparat des Labyrinthtyps sind die Zulassungen über die Beständigkeit der geometrischen Parameter des Rotors des Apparates und der Dichte des Latexsystems gemacht. Es ist die Präzisierung der Gleichung für die Berechnung des Radius der Luftblase des Schaumes unter Berücksichtigung der oberflächlichen Spannung und des Gefälles des Drucks durchgeführt. Die bekommene Gleichung lässt zu, den Umfang der Luftblase in dem Latexschaum je nach den physikalisch-mechanischen Eigenschaften des Latexsystems, den Konstruktiv- und Regimeparametern des Apparates für das Aufschäumen zu bestimmen.

Modélage du processus de la formation de l'écume dans un appareil du type labyrinthe

Résumé: L'appareil du type labyrinthe est une construction perspective pour l'écumage du caoutchouc mousse latex. Dans le présent article est mentionnée l'étude du processus de la formation de l'écume dans un appareil du type labyrinthe. Lors de l'étude ont été prises en compte les particularités de la production réelle dans laquelle les indices suivants sont définitifs lors de l'obtention de l'écume: tension superficielle et différence de tension dans l'appareil. Lors de l'élaboration de la description mathématique du mécanisme de la formation de l'écume dans un appareil du type labyrinthe sont mises les hypothèses de la constance des paramètres du rotor de l'appareil et de la densité du système latex. Est réalisée la précision de l'équation pour le calcul du rayon de la bulle de l'air compte tenu de la tension superficielle et la différence de tension. L'équation obtenue permet de définir la dimension de la bulle de l'air dans l'écume latex en fonction des propriétés du système latex, des paramètres constructifs et de régime de l'appareil pour barratage.

Авторы: *Борщев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; *Амелина Наталья Валерьевна* – кандидат технических наук, ведущий инженер, ООО «Спектр», г. Тамбов; *Сухорукова Татьяна Александровна* – магистрант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Карпушкин Сергей Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
