

*На правах рукописи*

**КУЛЬБАШНЫЙ Антон Сергеевич**

**РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ  
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛАТЕКСНОЙ ПЕНОРЕЗИНЫ**

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тамбов 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ») на кафедре «Переработка полимеров и упаковочное производство».

Научный руководитель

кандидат технических наук, профессор  
***Клишков Алексей Степанович***

Официальные оппоненты:

***Туголуков Евгений Николаевич,***  
доктор технических наук, профессор,  
Тамбовский государственный технический  
университет, профессор кафедры «Техника и  
технологии производства нанопродуктов»

***Скуратов Владимир Кириллович,***  
доктор технических наук, профессор,  
Московский государственный университет  
инженерной экологии, профессор кафедры  
«Полимерсервис»

Ведущая организация

ОАО «Научно исследовательский институт  
резинотехнического машиностроения»  
(г. Тамбов)

Защита состоится 25 мая 2012 г. в 15 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 ФГБОУ ВПО «ТГТУ» по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Ленинградская, д. 1, ауд. 60.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, скреплённые гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, ФГБОУ ВПО «ТГТУ», ученому секретарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Автореферат разослан 24 апреля 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

***Нечаев Василий Михайлович***

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время из-за увеличения количества потребителей, в частности, транспортной, мебельной промышленности, производства упаковки, основы для ковров и т.д., возрастает потребность в получении пенорезины. Возникает необходимость разработки, модернизации и внедрения в производство технологии и оборудования линии по производству высококачественной пенорезины. До настоящего времени разработка аппаратного оформления данного производства основывалась на опыте работы предшествующего оборудования. При этом оно характеризуется завышенными массогабаритными и энергоемкими показателями. В связи с этим актуальными являются комплексные исследования по оптимальному проектированию линии производства пенорезины.

Работа выполнена в соответствии с федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2012 годы» Государственный контракт № 14.740.11.0141 от 13.09.2010 г.

**Цель работы.** Диссертационная работа посвящена исследованию процесса изготовления латексной пенорезины и его аппаратного оформления, включающего новую технологическую операцию – вспенивание латекса в устройстве лабиринтного типа. В данной работе поставлены **задачи**:

- разработать конструкции вспенивателя как устройства, обеспечивающего одновременно получение пены и ее подачу на следующую технологическую операцию;
- провести экспериментальные исследования по определению режимов работы вспенивателя в зависимости от кратности пены;
- разработать математическое описание основных операций производства пенорезины: получение пены из латекса в лабиринтном вспенивателе; определение длины агрегата желатинирования-вулканизации на основе решения задачи нестационарной теплопроводности, гидродинамики потока моющей жидкости в валковой машине;
- разработать математическую модель основных стадий процесса изготовления пенорезины, которая может служить для целей оптимизации работающего оборудования и для разработки нового;
- создать лабораторную установку для получения пены и ее транспортирования;
- провести экспериментальные исследования по определению режимов получения пены заданного качества.

**Научная новизна работы.** Разработана новая конструкция вспенивателя латексной смеси, позволяющая эффективно создавать пену и одновременно осуществлять ее транспортирование на следующую технологическую операцию. Предложена методика определения оптимальной длины камеры агрегата желатинирования-вулканизации, на основе которой можно производить его расчет и конструирование для заданных условий производства.

**Практическая ценность.** Доказана эффективность получения пенорезины с использованием вспенивателя лабиринтного типа. Разработана инженерная методика для расчета режимных и конструктивных параметров оборудования для производства пенорезины.

Методики расчета оптимальных параметров вспенивателя, агрегата желатинирования-вулканизации (АЖВ), машины по отмывке пенорезины приняты ОАО «НИИРТМаш» (г. Тамбов) для промышленного проектирования линии по производству пенорезины, с разработанным вспенивателем лабиринтного типа. Расчетный экономический эффект от результатов работы составляет 245 тыс. р. в год.

Результаты проведенных исследований и созданная на их основе инженерная методика и программное обеспечение использованы и внедрены в учебный процесс Тамбовского государственного технического университета и используются при подготовке инженеров по специальности 655400 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, в нефтехимии и биотехнологии» в рамках дисциплины «Оборудование для переработки полимерных материалов».

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы доложены на XII научной конференции ТГТУ «Фундаментальные и прикладные исследования, инновационные технологии, профессиональное образование» (г. Тамбов, 2008), на II Всероссийской научно-инновационной молодежной конференции (с международным участием, г. Тамбов, 2010 г.), на научно-практической конференции ТГТУ «Решение региональных экологических проблем» (г. Тамбов, 2011).

**Публикации.** По материалам исследований опубликовано шесть работ, из них пять в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников из 72 наименований и 3 приложений. Содержит 121 страницу основного текста, 31 рисунок, 3 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано краткое содержание работы, обоснована ее актуальность, научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе** проведен литературный обзор современного состояния в области технологии и оборудования для изготовления пенорезины из латекса, дана характеристика исходных материалов для ее получения, представлена структурная схема процесса изготовления.

Рассмотрено поведение пены после ее получения и факторы, влияющие на размер пузырьков и механизм их разрушения.

Первая глава завершается постановкой задач исследования.

**Вторая глава** посвящена рассмотрению анализа оборудования для получения пены из латекса. В настоящее время применяемые в промышленности вспениватели имеют одинаковую принципиальную схему и отличаются только конструкцией отдельных элементов. Наибольшее распространение имеют вспениватели английской фирмы «Oakes» и вспениватель типа ВН-1, разработанный СКБ «Ленполимермаш» на базе голландского вспенивателя «Eur-o-matic». Анализ конструкций и работы указанных вспенивателей показывает, что они имеют ряд существенных недостатков:

- большая металлоемкость вспенивателей и смесительной головки;
- трудность разборки при чистке;
- большой разброс по размерам пузырьков в пене;

– необходимость дополнительного насоса для прокачки латекса через вспениватель.

С целью ликвидации указанных недостатков была предложена конструкция вспенивателя на основе лабиринтного насоса.

Для получения качественной пены необходимо организовать наиболее интенсивную гидродинамическую обстановку в аппарате для смешения двух потоков жидкости, т.е. необходимо иметь значительное число Рейнольдса. В ходе исследования установлено, что больший эффект будет иметь место, если на турбулентный поток будет накладываться дополнительно вихревое движение, что способствует более быстрому и качественному смешению.

Такая гидродинамическая обстановка в потоке жидкости создается в проточной части работающего лабиринтного вспенивателя (основными элементами конструкции лабиринтного вспенивателя являются ротор и статор, имеющие многозаходную нарезку взаимопротивоположного направления). При вращении ротора на его выступах и выступах статора происходит непрерывное возникновение и отрыв вихрей, в результате чего наблюдается обмен количествами движения жидкости, прилегающей к ротору, с жидкостью, прилегающей к статору. Такой механизм воздействия рабочих органов на жидкость приводит к созданию напора в жидкости, т.е. образованию насосного эффекта.

Использование лабиринтного вспенивателя для вспенивания жидкостей дает возможность одновременно перемещать и вспенивать латекс. Применение конструкции ротора и статора в виде расходящихся усеченных конусов по ходу движения жидкости облегчает разборку и чистку вспенивателя, который в процессе работы забивается коагулятом латекса.

Вспенивание латексной смеси в устройстве такого типа происходит в результате ее смешения с воздухом. Представить четко механизм образования воздушных пузырьков довольно затруднительно. Можно только предположить, что интенсивность смешения, рост образующихся пузырьков и их размер определяется гидродинамическим фактором, геометрией рабочей поверхности устройства и параметрами работы вспенивателя.

Тогда число образующихся пузырьков при вращении ротора можно представить в виде зависимости

$$\frac{dN_1}{d\tau} = z \text{Re}, \quad (1)$$

где  $z$  – число заходов винта;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $\tau$  – время пребывания латекса во вспенивателе.

$$\text{Re} = \frac{d_{\text{пр}} v \rho}{\mu}, \quad (2)$$

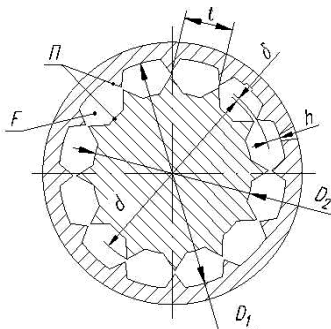
где  $d_{\text{пр}}$  – приведенный диаметр проходного сечения;  $v$  – окружная скорость ротора;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости латекса;  $\rho$  – плотность латекса.

$$d_{\text{пр}} = 4R_2 ; \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{F}{\Pi} . \quad (4)$$

Подставив (3) и (4) в (2), получим

$$\text{Re} = \frac{4\nu F \rho}{\mu \Pi} . \quad (5)$$



**Рис. 1. Поперечный  
разрез вспенивателя  
лабиринтного типа**

На рисунке 1 представлен поперечный разрез вспенивателя лабиринтного типа. При работе вспенивателя происходит как образование, так и разрушение пузырьков в результате их объединения, обусловленное разностью диаметров и внутреннего давления.

Принимая такой механизм уменьшения количества пузырьков, будем считать, что число их определяется зависимостью

$$\frac{dN_2}{d\tau} = bN_1 , \quad (6)$$

где  $b$  – коэффициент.

Тогда количество образованных пузырьков

$$dN = dN_1 - dN_2 . \quad (7)$$

Из уравнений (1), (6), (7) определяем число пузырьков

$$N = Z \text{Re} \tau (1 - 0,5b\tau) . \quad (8)$$

В свою очередь, число пузырьков в пене

$$N = \frac{3V_b}{4r^3\pi} . \quad (9)$$

где  $V_b$  – объем воздуха в пене;  $r$  – средний радиус пузырьков в пене.

В уравнении (9) выразим  $V_b$  через кратность пены « $K$ », которая определяется выражением

$$K = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{л}}} = \frac{V_{\text{л}} + V_b}{V_{\text{л}}} , \quad \text{откуда} \quad V_b = V_{\text{л}}(K - 1) ,$$

где  $V_{\text{л}}$  – объем латекса;  $V_{\text{п}}$  – объем пены.

Тогда

$$N = \frac{3V_{\text{л}}(K - 1)}{4r^3\pi} . \quad (10)$$

Из уравнений (8) и (10) определяем радиус пузырьков

$$r = \sqrt[3]{\frac{3V_{\text{л}}(K-1)}{4\pi z \operatorname{Re} \tau (1-0,5b \tau)}}. \quad (11)$$

Расход латекса при вспенивании

$$Q_{\text{л}} = \frac{V_{\text{л}}}{\tau}. \quad (12)$$

Линейная скорость вращения ротора

$$v = \frac{\pi d_{\text{ср}} n}{60}, \quad (13)$$

где  $d_{\text{ср}}$  – средний наружный диаметр ротора;  $n$  – число оборотов ротора.

Подставив значения  $\operatorname{Re}$ ,  $v$ ,  $Q_{\text{л}}$  в (11), получим

$$r = 1,045 \sqrt[3]{\frac{3Q_{\text{л}}(K-1)\Pi \mu}{z d_{\text{ср}} n F (1-0,5b \tau) \rho}}. \quad (14)$$

Смоченный периметр проходного сечения вспенивателя

$$\Pi = [\pi(D_1 + D_2) + 2t(2 - z)], \quad (15)$$

где  $D_1$  – диаметр впадин;  $D_2$  – диаметр впадин втулки;  $t$  – ширина зуба.

В свою очередь,

$$D_1 = d_{\text{ср}} + 2t; \quad (16)$$

$$D_2 = d_{\text{ср}} + 2t. \quad (17)$$

Подставив (16) и (17) в (15), получим

$$\Pi = 2(\pi d_{\text{ср}} + 2t - tz). \quad (18)$$

Проходное сечение вспенивателя

$$F = \left[ \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) - 2fz \right], \quad (19)$$

где  $f$  – площадь в сечении ротора, равная  $f = \frac{t_3}{4} \sqrt{3}$ .

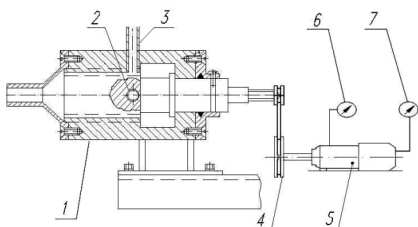
Заменив  $D_1$  и  $D_2$  через их значения, получим

$$F = \pi d_{\text{ср}} t - \frac{zt^2}{2} \sqrt{3}, \quad (20)$$

Подставив (18) и (20) в (14), получим

$$r = 1,045 \sqrt[3]{\frac{3Q_{\text{л}}(K-1)\mu(\pi d_{\text{ср}} + 2t - tz)}{z d_{\text{ср}} n p (1 - 0,5bt) \left( \pi d_{\text{ср}} t - \frac{zt^2}{2} \sqrt{3} \right)}}. \quad (21)$$

Уравнение (21) характеризует радиус пузырька, который зависит от технологических и конструктивных параметров и реологических свойств латекса.



**Рис. 2. Схема установки вспенивателя:**

- 1 – вспениватель; 2 – штуцер подачи латекса; 3 – патрубок подсоса воздуха;
- 4 – клиноременная передача;
- 5 – электродвигатель амперметр;
- 6 – вольтметр; 7 – амперметр

В третьей главе описана конструкция лабораторной установки со вспенивателем лабиринтного типа, схема которого представлена на рис. 2.

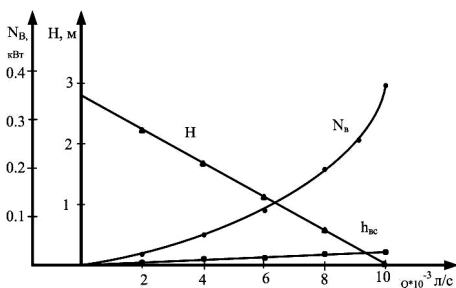
Дана методика и программа проведения эксперимента исследований. Рассмотрено течение двухфазной жидкости в проточной части вспенивателя.

Проведены экспериментальные исследования по определению рабочих характеристик вспенивателя, которые представлены на рис. 3.

Экспериментальные исследования образования пены при различных режимах проводились на модельной жидкости,

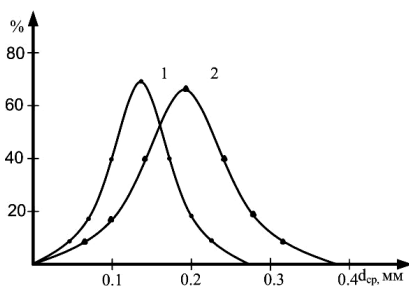
которая по основным физическим параметрам аналогична латексу. Контрольные испытания проводились на латексе марки БС–50.

Кривая распределения диаметра пузырьков при различной кратности пены представлена на рис. 4. При этом с увеличением кратности пены возрастает смещение кривой в сторону повышенных размеров пузырьков.



**Рис. 3. Зависимость характеристик вспенивателя от производительности:**

$H$  – величина напора;  $N_{\text{в}}$  – расходная мощность;  $h_{\text{вс}}$  – вакуумическая высота всасывания

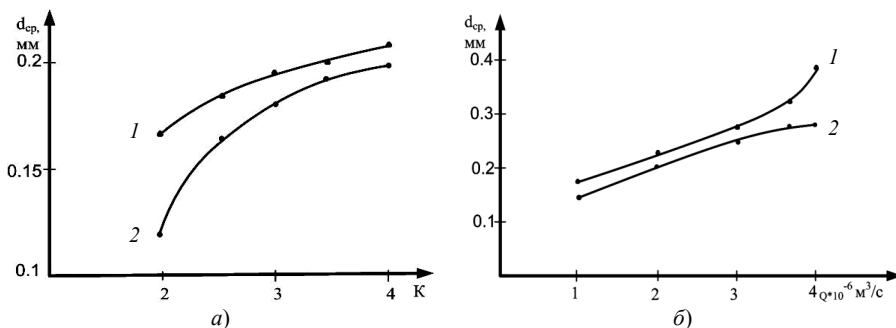


**Рис. 4. Кривые распределения диаметров пузырьков в пене модельной жидкости при  $Q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $n = 3260 \text{ об/мин}$ :**

- 1 – кратность  $K = 2$ ;
- 2 – кратность  $K = 4$



Как показали эксперименты, на размер пузырьков оказывают существенное влияние режимы работы вспенивателя. Из рисунка 5 видно, что с увеличением кратности пены размер пузырьков увеличивается при уменьшении числа оборотов ротора, также возрастает диаметр пузырьков при увеличении расхода латекса.

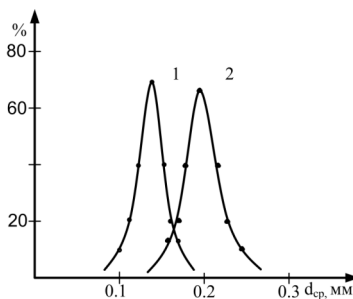


**Рис. 5. Зависимость среднего диаметра пузырьков от:**  
 а – кратности пены в модельной жидкости при  $Q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ;  
 б – от производительности вспенивателя при  $K = 4$ ;  
 1 –  $n = 2312$  об/мин; 2 –  $n = 3260$  об/мин

Результаты проведенных исследований представлены в виде графика на рис. 6. Как видно, значение среднего диаметра пузырьков практически не отличаются от величин пузырьков при вспенивании модельной жидкости. Однако для латекса характерна более монодисперсная пена. При этом величина среднего диаметра пузырьков удовлетворительно описывается уравнением (21), где поправочный коэффициент  $b = 0,43$ , определенный на основе экспериментальных данных.

Проведенные экспериментальные исследования по пенообразующей способности лабиринтного вспенивателя подтверждают возможность его использования как для получения пены, так и для её транспортирования к последующей технологической операции. При этом отпадает необходимость применения латексного насоса, что уменьшает расходы на производство пенорезины.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований работы вспенивателя предложен порядок расчета, для которого требуется иметь данные, исходя из потребности конкретного производства, а именно: расход латексной смеси –  $Q_{\text{л}}, \text{ м}^3/\text{с}$ ; кратность пены – « $K$ »; число оборотов ротора –  $n$ , об/мин;  $H$  – напор, мм. вод. ст.



**Рис. 6. Кривые распределения диаметров пузырьков в пене латекса марки БС-50 при  $Q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $n = 3260$  об/мин:**  
 1 – кратность  $K = 2$ ; 2 – кратность  $K = 4$

На основании работ по исследованию лабиринтных насосов выбираем треугольный профиль резьбовой нарезки с углом  $\alpha = 60^\circ$ , который создает максимальный напор при равенстве других параметров, т.е. обеспечивает максимальное вихреобразование в проточной части вспенивателя.

Определяем величину проходного сечения вспенивателя по формуле (22), задавая диаметр винта  $d$ :

$$F_{\text{пр}} = \frac{Q}{\eta_{\text{т}} \frac{V}{2} \cos \alpha}; \quad V = \frac{\pi d n}{60}, \quad (22)$$

где  $\eta_{\text{т}} = 0,4 \dots 0,5$  – коэффициент увеличения.

Шаг между зубьями в поперечном сечении ротора  $t = \frac{\pi d}{z}$ .

Принимаем число заходов  $z$  и определяем высоту нарезки из соотношения  $\frac{h}{t} = 0,3$ .

Рабочая длина ротора и статора определяется по формуле

$$L = \frac{k \pi d g H}{k_1 z \left( \frac{V}{2} - \frac{Q}{F_{\text{пр}}} + \operatorname{tg} \alpha \right)^2}. \quad (23)$$

Проверяем значение проходного сечения вспенивателя по формуле

$$F_{\text{пр}} = \left[ \frac{\pi}{4} \left( D^2 - d^2 \right) - 2 z f \right], \quad (24)$$

где  $D$  и  $d$  – соответственно диаметры впадин статора и ротора;  $f$  – площадь сечения треугольника нарезки.

**Четвертая глава** посвящена вопросу формирования пенорезины в агрегате желатинирования-вулканизации. Процесс желатинирования можно описать уравнениями связанного теплообмена:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) - v \frac{\partial t}{\partial x} - \frac{r' \partial u}{c \partial \tau}, \quad (25)$$

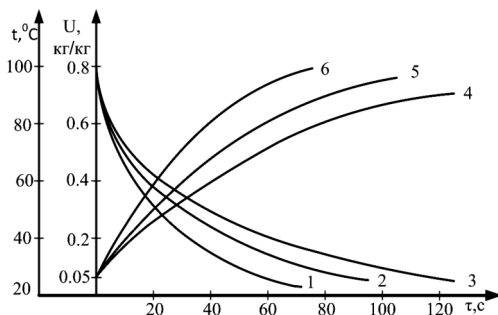
$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_{\text{т}} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + v \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\lambda \varepsilon}{\rho r'} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) + \frac{\varepsilon c}{r'} v \frac{\partial t}{\partial x}. \quad (26)$$

Численное решение этого уравнения представлено графиком на рис. 7, по которому рассчитываем длину камеры желатинирования

$$L_{\text{ж}} = \tau v = 120 \cdot 0,02 = 2,4 \text{ м}. \quad (27)$$

**Рис. 7. Изменения  
влажности и температуры  
пены при ее желатинировании  
в зависимости от времени  
при скорости движения  
пенорезины  $v = 0,02$  м/с:**

1, 2, 3 – изменения влажности соответственно в верхнем слое, в середине толщины и на подложке; 6, 5, 4 – изменение температуры в аналогичных точках



После желатинирования идет процесс вулканизации пенорезины. Для решения задачи теплопроводности при вулканизации пенорезины используем задачу нестационарной теплопроводности, описываемой уравнениями (28) с краевыми и граничными условиями (29) – (33):

$$\frac{\partial t(x, y, \tau)}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right), \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq y \leq h, \quad \tau > 0; \quad (28)$$

$$t(x, y, 0) = f(x, y); \quad (29)$$

$$\lambda \frac{\partial t(0, y, \tau)}{\partial x} - \alpha_1 (t(0, y, \tau) - t_{c1}) = 0; \quad (30)$$

$$\lambda \frac{\partial t(l, y, \tau)}{\partial x} + \alpha_2 (t(l, y, \tau) - t_{c2}) = 0; \quad (31)$$

$$\lambda \frac{\partial t(x, 0, \tau)}{\partial y} - \alpha_3 (t(x, 0, \tau) - t_{c3}) = 0; \quad (32)$$

$$\lambda \frac{\partial t(x, h, \tau)}{\partial y} + \alpha_4 (t(x, h, \tau) - t_{c4}) = 0. \quad (33)$$

Решением этой задачи является уравнение (34), которое имеет вид

$$t(x, y, \tau) = t_{c1} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U(y)W(x)}{N} + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{W(x)Z(y)V(\tau)}{NM}. \quad (34)$$

Для решения данной задачи составлена программа расчета на ЭВМ. В качестве примера приводится расчет температуры в пенорезине при данных: начальная температура заготовки 100 °C; температура горячего воздуха 160 °C; ширина заготовки 0,6 м; толщина заготовки 0,04 м; теплоемкость резины  $1,25 \cdot 10^3$  Дж/(кг·град); плотность резины 60 кг/м<sup>3</sup>; теплопроводность резины 0,038 Вт/(м·град).

По графику, представленному на рис. 8, рассчитана длина камеры вулканизации при  $t_b = 148$  °C;  $\tau_b = 640$  с.

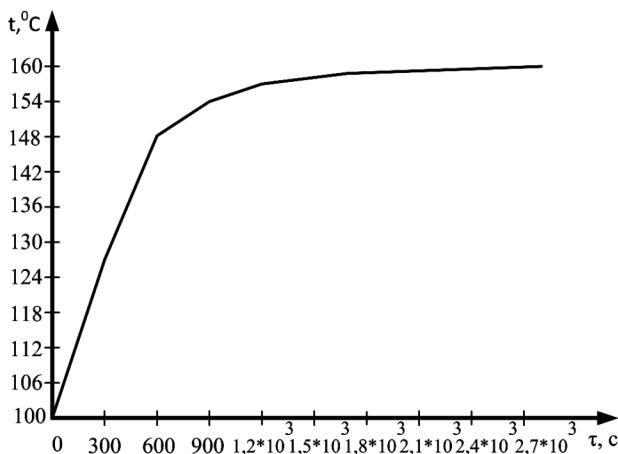


Рис. 8. Зависимость времени вулканизации от температуры

Длина участка вулканизации

$$L_B = \tau_B v = 640 \cdot 0,02 = 12,8 \text{ м.} \quad (35)$$

Общая длина агрегата желатинирования-вулканизации

$$L_0 = L_{\text{ж}} + L_B = 2,4 + 12,8 = 15,2 \text{ м.} \quad (36)$$

В пятой главе рассмотрено устройство для отмывки пенорезины после агрегата желатинирования-вулканизации.

Мойка изделия необходима для придания ему высоких санитарно-гигиенических свойств. В настоящее время мойка и отжим производится в установках валкового типа.

Недостатком существующих моечно-отжимных устройств является высокая остаточная влажность изделий, которая является основным критерием оценки

эффективности процесса обезвоживания. Этот процесс зависит как от конструктивных параметров, так и от режимов работы.

Качество промывки и целостность изделий обеспечивается определенными режимами, зависящими от условий движения изделия между валами и течением влаги через поры пенорезины.

Основным параметром, требующим определения, является усилие на валах, которое необходимо для расчета нажимных пружин.

Схема работы отжимных валов представлена на рис. 9.

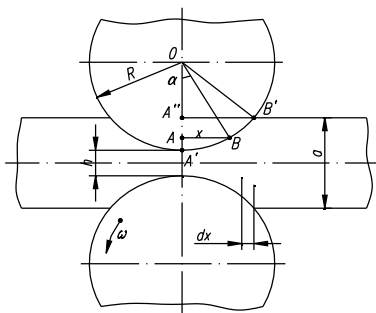


Рис. 9. Схема работы отжимных валов

В работе проведены исследования по отжиму пенорезины от влаги между парой валков диаметром 800, 600, 400 мм с различной твердостью покрытия.

Из анализа полученных данных видно, что увеличение диаметра валков с 400 до 600 мм повышает эффект отжима, дальнейшее увеличение диаметра не повышает, а наоборот, хоть и незначительно, но снижает качество отжима. Практически оптимальный диаметр валков лежит в пределах 600 мм.

После процесса отмывки в валковой машине в пенорезине остается достаточно много влаги. Анализ рассмотренных работ по сушке пенорезины после отмывки показывает, что наиболее приемлемым способом сушки, как с точки зрения качества, так и расхода энергии, является метод сквозной продувки изделия горячим воздухом. Этот способ позволяет интенсифицировать процесс за счет большой поверхности внутренних пор и пустот. Показано, что в исследованном диапазоне изменения параметров сушки процесс протекает целиком в период падающей скорости сушки.

Расчетная формула для определения продолжительности сушки

$$\tau = 125 \frac{(G_{\text{уд}}^{\text{сyx}})^{0,8}}{aE(V\rho)^{0,6}} \ln \frac{[a + b(u_2 - u_p)] [u_1 - u_p]}{[a + b(u_1 - u_p)] [u_2 - u_1]}, \quad (37)$$

Кроме конвективной сушки и сушки фильтрацией может быть использован метод с применением токов высокой и сверхвысокой частоты (ТВЧ и СВЧ). Применение ТВЧ и СВЧ – энергии обеспечивает равномерный нагрев изделия по всей толщине независимо от конфигурации изделия. При этом процесс сокращается до 90% при малом тепловом воздействии на изделие, благодаря чему улучшается качество – повышается износоустойчивость. Основным недостатком указанного метода является повышенный расход электроэнергии. Так, на удаление 1 кг влаги расходуется около 2 кВт/ч. Количество тепла, образующего при воздействии переменного электромагнитного поля на диэлектрические материалы, можно определить из выражения

$$Q = kE\epsilon \operatorname{tg} \delta \quad [\text{Вт/см}^2], \quad (38)$$

где  $k = 0,133 \cdot 10^{-12}$  – для ТВЧ;  $k = 0,556 \cdot 10^{-12}$  – для СВЧ.

К недостаткам применения ТВЧ и СВЧ следует отнести повышенную опасность для обслуживающего персонала, а также возможность возгорания пенорезины при малой влажности.

Анализ рассмотренных методов сушки с точки зрения экономической эффективности показывает более целесообразное применение метода сквозной фильтрации. Этот метод будет работать более эффективно, когда камера сушки работает под разрежением, создаваемым всасывающим трубопроводом вентилятора.

Экспериментальные исследования по сушке пенорезины после отмывки, проведенные И.Ф. Пикусом, показали, что наиболее эффективным методом является применение вентилятора, который сокращает время сушки на 5%, а в случае применения воздухоудки может достигать 50%. Однако применение воздухоудки

резко повышает затраты энергии на сушку. Поэтому более целесообразно применение вентиляторов высокого давления с сушкой во всасывающем трубопроводе.

В **шестой главе** на основе технологической схемы изготовления пенорезины с использованием лабиринтного вспенивателя предложено математическое описание процесса, которое устанавливает связь выходных параметров величин с входными, определяющими режим ведения процесса.

Экономическую целесообразность применения вспенивателя лабиринтного типа, который может заменить латексный насос, можно оценить путем сравнения затрат мощности при работе с существующей линией и в случае замены насоса на вспениватель.

Для сравнительного расчета принимаем производительность по латексу в обоих случаях одинаковой и равной  $Q = 200$  кг/ч. Принимаем мощность латексного насоса  $N_1 = 2,1$  кВт. Мощность  $N_2$  вспенивателя с учетом его КПД и коэффициента запаса будет равна

$$N_2 = K \frac{N_n}{\eta} = \frac{2 \cdot 0,075}{0,35} = 0,43 \text{ кВт}, \quad (39)$$

где  $K$  – коэффициент запаса;  $\eta$  – КПД вспенивателя.

Затраты мощности на единицу продукции существующего оборудования

$$S_1 = \frac{2,1}{200} = 0,0105 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}. \quad (40)$$

Затраты при работе вспенивателя лабиринтного типа

$$S_2 = \frac{0,43}{200} = 0,00215 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}. \quad (41)$$

Экономическая эффективность

$$S_2 = \frac{S_1}{S_2} = \frac{0,0105}{0,00215} = 4,88. \quad (42)$$

Применение лабиринтного вспенивателя сокращает в 4,88 раза затраты электроэнергии на единицу выпускаемой продукции.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Предложена новая конструкция вспенивателя латексной смеси в производстве пенорезины, которая позволяет не только получать пены, но и их транспортирование к последующей технологической операции.

2. Проведенные экспериментальные исследования вспенивателя лабиринтного типа подтверждают возможность его применения как для вспенивания латекса, так и его транспортирования.

3. Предложена методика получения пены во вспенивателе лабиринтного типа, которая подтверждена результатами проведенных экспериментов.
4. На основе экспериментальных данных разработана зависимость полученных размеров воздушных пузырьков пены от технологических параметров ведения процесса вспенивания.
5. Показано, что с увеличением числа оборотов вращения ротора размер пузырьков уменьшается и увеличивается их монодисперсность.
6. Для всех режимов работы вспенивателя кривые распределения размеров пузырьков приближается к закону нормального распределения с математическим ожиданием, определяющим средний размер пузырьков.
7. Разработана методика расчета вспенивателя, которая может быть использована при проектировании нового оборудования для получения пенорезины.
8. Предложена методика инженерного расчета получения пенорезины с использованием вспенивателя лабиринтного типа.
9. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана конструкция лабиринтного вспенивателя для промышленного производства.
10. Разработана методика расчета оптимальной длины камеры желатинирования-вулканизации.
11. Предложены уравнения, описывающие работу валковой отжимной машины в процессе отмывки пенорезины от примесей, которая подтверждается экспериментальными данными.
12. Решена в аналитической форме задача теплопроводности латексной пены при сушке после ее отмывки.
13. Показана экономическая целесообразность применения вспенивателя лабиринтного типа в технологической схеме изготовления пенорезины.
14. Методики расчета оптимальных параметров вспенивателя, агрегата желатинирования-вулканизации (АЖВ), машины по отмывке пенорезины приняты ОАО «НИИРТМаш» (г. Тамбов) для промышленного проектирования линии по производству пенорезины, с разработанным вспенивателем лабиринтного типа. Расчетный экономический эффект от результатов работы составляет 245 тыс. р. в год.
15. Результаты проведенных исследований и созданная на их основе инженерная методика и программное обеспечение были использованы и внедрены в учебный процесс Тамбовского государственного технического университета и используются при подготовке инженеров по специальности 655400 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, в нефтехимии и биотехнологии» в рамках дисциплины «Оборудование для переработки полимерных материалов».

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$z$  – число заходов винта;  $d_{\text{пр}}$  – приведенный диаметр проходного сечения;  $v$  – окружная скорость ротора;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости латекса;  $\rho$  – плотность латекса;  $F$  – проходное сечение вспенивателя;  $\Pi$  – периметр проходного сечения;  $R_2$  – радиус гидравлический;  $L_{\text{ж}}$  – длина камеры желатинирования;  $L_{\text{в}}$  – длина камеры вулканизации;  $L_o$  – общая длина агрегата желатинирования-вулканизации.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

*В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Кульбашный, А.С. Разработка конструкции вспенивателя латексной смеси и методика его расчета / А.С. Кульбашный, А.С. Клинков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 643 – 648.
2. Интенсификация сушки латексных гелей / Н.В. Амелина, А.С. Кульбашный, А.С. Клинков, В.Г. Однолько // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2010. – № 7 – 9(30). – С. 325 – 328.
3. Определение расхода коагулянта при гелеобразовании / Н.В. Амелина, А.С. Кульбашный, А.С. Клинков, П.С. Беляев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2010. – № 7 – 9(30). – С. 322.
4. Режимы движения формы при изготовлении маканых изделий из латекса / Н.В. Амелина, А.С. Кульбашный, А.С. Клинков, В.Г. Однолько // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2010. – № 10 – 12(31). – С. 355.
5. Экспериментальные исследования работы вспенивателя лабиринтного типа / Н.В. Амелина, А.С. Кульбашный, А.С. Клинков, В.Г. Однолько // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2011. – № 2(33). – С. 368.

*Публикации в других изданиях:*

6. Применение метода ПФЭ для анализа работы линии технических напечечников / Н.В. Амелина, А.С. Кульбашный, А.С. Клинков, Д.Л. Полушкин // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2010. – Вып. 23. – С. 167 – 169.



---

Подписано в печать 20.04.2012.  
Формат 60 × 84/16. 0,93 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 197

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14