

А.С. КЛИНКОВ
А.С. КУЛЬБАШНЫЙ
М.В. СОКОЛОВ
В.Г. ОДНОЛЬКО

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
ЛАТЕКСНОЙ ПЕНОРЕЗИНЫ**



Москва, 2012

УДК 621.43.036.9
ББК Л728.1
Р248

Рецензенты:

Доктор технических наук,
профессор кафедры "Гидравлика и теплотехника"
ФГБОУ ВПО "ТГТУ"
Н.П. Жуков

Кандидат технических наук
заместитель директора ОАО "НИИРТМаш"
В.Н. Шашков

Р248 Расчет и проектирование процесса и оборудования для производства латексной пенорезины / А.С. Клинков, А.С. Кульбашный, М.В. Соколов, В.Г. Однолько. – М.: Издательский дом "Спектр", 2012. – 96 с. – 400 экз.
ISBN 978-5-4442-0014-8.

Рассмотрены основные технологические и конструктивные аспекты проектирования смесителя – вспенивателя лабиринтного типа для получения устойчивой латексной пены. Особое внимание уделено вопросам моделирования процесса пенообразования, формирования пенорезины в агрегате желатинирования и вулканизации. Решена задача определения минимальной длины участка желатинирования. Приведена инженерная методика расчета получения пенорезины с использованием вспенивателя лабиринтного типа.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и эксплуатацией смесительного оборудования по переработке полимерных материалов, а также аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов, специализирующихся в области переработки пластмасс и эластомеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект № 7.3766.2011 по теме «Разработка энергоэффективной технологии и оборудования утилизации отходов полимерной тары и упаковки» и в рамках научной школы (НШ 01.2012.05 ТГТУ) от 28.05.2012 «Теория и практика устойчивого развития природопромышленных систем. Проектирование региональных утилизирующих комплексов, технологий и оборудования».

УДК 621.43.036.9
ББК Л728.1

ISBN 978-5-4442-0014-8

© А.С. Клинков, А.С. Кульбашный,
М.В. Соколов, В.Г. Однолько, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Улучшение экономического и социального положения страны может быть достигнуто путем повышения темпов и эффективности развития экономики на базе ускорения научно-технического прогресса, технического перевооружения и реконструкции производства. В связи с этим особая роль отводится науке и технике в качественном преобразовании производительных сил, переводе экономики на рельсы всесторонней интенсификации. Требуется ускоренная разработка и внедрение в производство новых поколений высокоэффективной техники, выпуск прогрессивного тепло- и массообменного оборудования на основе новых технологических процессов. Эти задачи касаются и производства пенорезины из латекса.

Учитывая относительную обособленность и узость латексного производства в народном хозяйстве, на данном этапе целесообразным является использование математического моделирования и оптимизации основных процессов латексной технологии, как для целей проектирования необходимого оборудования, так и для его оптимизации при эксплуатации. В настоящее время метод математического моделирования применяется во многих областях науки и техники, начиная от изучения простейших физико-химических процессов и кончая сложными производственными, экономическими и биологическими системами.

Успех распространения метода математического моделирования объясняется возможностью с его помощью исследовать практически лю-

бые системы, даже те, которые изучать другими способами невозможно или очень трудно. Многолетняя практика доказала, что математическое моделирование – одно из основных методологических достижений научно-технической революции.

В производстве пенорезины из латекса большинство научных разработок технологического и конструктивного характера решалось традиционными методами на основе имеющегося практического опыта. Поэтому трудно проводить глубокий анализ технических решений проектируемого оборудования из-за отсутствия математических моделей технологических процессов, лежащих в основе разрабатываемых проектов.

Исследованиями вопросов латексной технологии занималось достаточно большое число отечественных и зарубежных ученых. Большой вклад в исследование латексов, их смесей и технологии внесли В.В. Черная, П.Д. Трофимович, Б.А. Майзелис, Ю.В. Грубман, Е.А. Горелик, М.С. Силюнова, Т.Н. Каменщикова, В.В. Верхоланцев, В.Л. Кузнецов, Р.Э. Нейман, А.В. Лебедев, Р.Дж. Нобль, В. Шютц, Е.Б. Бредфорд, И.В. Вандерхофф и многие другие. Проведенные исследования показывают, что свойства латексов и их смесей существенно влияют на характер протекания технологических процессов и определяют необходимые параметры этих процессов. Знание закономерностей протекания процессов латексной технологии позволяет разрабатывать оптимальные варианты аппаратного оформления этих процессов при качественном получении необходимых изделий. Поэтому с целью разработки промышленного оборудования, его оптимальной эксплуатации в данной работе изложены результаты исследований гидро-, тепломассообменных закономерностей основных звеньев процесса изготовления пенорезины из латекса и предложена методология их использования для практического применения.

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 в основном 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 посвящена исследованию процесса изготовления латексной пенорезины и его аппаратного оформления, включающего новую технологическую операцию – вспенивание латекса в устройстве лабиринтного типа. В данной работе решались следующие задачи:

- разработка конструкции вспенивателя, как устройства, обеспечивающего одновременно получение пены и ее подачу на следующую технологическую операцию;

- проведение экспериментальных исследований по определению режимов работы вспенивателя в зависимости от кратности пены;

- разработка математического описания основных операций производства пенорезины: получение пены из латекса в лабиринтном вспенивателе, определение длины камеры агрегата желатинирования–вулканизации на основе решения задачи нестационарной теплопроводности, гидродинамики потока моющей жидкости в валковой машине;

- разработка математического описания основных стадий процесса изготовления пенорезины, которая может служить для целей оптимизации работающего оборудования и для разработки нового;

- создание лабораторной установки для получения пены и ее транспортирования;

- проведение экспериментальных исследований по определению режимных параметров получения пены из латекса заданного качества.

Разработана новая конструкция вспенивателя латексной смеси, позволяющая наиболее 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.

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

Разработанный вспениватель лабиринтного типа и методики расчета основных параметров вспенивателя, агрегата желатинирования–вулканизации (АЖВ), машины по отмывке пенорезины приняты ОАО "НИИРТМаш" (г. Тамбов) для промышленного проектирования линии по производству пенорезины. Расчетный экономический эффект от результатов работы составляет 245 тысяч рублей год.

Результаты работы внедрены в учебный процесс: ФГБОУ ВПО "Тамбовского государственного технического университета" и используются при подготовке инженеров по специальности 241000 "Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, в нефтехимии и биотехнологии" в рамках дисциплины "Оборудование для переработки полимерных материалов"; Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина; Военного авиационного инженерного университета (г. Воронеж) по дисциплине "Радиационная, химическая и биологическая защита".

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ПЕНОРЕЗИНЫ

1.1. ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Основными необходимыми материалами для получения пенорезины являются латексы различного типа, но в основном используется латекс натуральный. Пенорезина представляет собой высокопористый материал с низкой плотностью ($0,1 \dots 0,06 \text{ г/см}^3$) и достаточной твердостью (модуль при сжатии 60%, $1 \dots 4,5 \text{ Н/см}^2$). Она широко используется для сидений автомобилей, в мебельной промышленности, в качестве подложки ковров и т.д. Низкая плотность в сочетании с приемлемыми физико-механическими (твердость, сопротивление многократным деформациям, старению) и гигиеническими свойствами (этому способствует открытая структура пор латексной пенорезины) позволяет ей успешно конкурировать с пенополиуританом.

Натуральные латексы представляют собой консервированный и концентрированный сок бразильской гевеи. Латекс – типичный пример коллоидного состояния высокополимеров, их водную дисперсию. Натуральный латекс имеет размеры частиц примерно $0,05 \dots 1,0 \text{ мкм}$. Латексная частица в основе своей состоит из плотной, несколько эластичной наружной оболочки, внутри которой находится жидкое, вязкое вещество. Сверху оболочка покрыта защитным слоем, состоящим из протеина, мыла и других защитных материалов. Содержание сухого вещества в латексе колеблется в пределах 30...45%, для центрифугированного латекса – 60% и концентрированного до 75%. Удельный вес латекса зависит от концентрации в нем каучука и лежит в пределах $9500 \dots 9800 \text{ Н/м}^3$. Свежий латекс показывает значение в пределах $\text{pH} = 5,8$.

Центральное место в теории коллоидной химии латексов и практического их использования занимает вопрос коагуляции, так как получение резинотехнических изделий из латекса связано в первую очередь с ней. Основными видами или методами коагуляции являются: нагревание, введение электролитов (желатинирующих агентов), механические воздействия, замораживание – оттаивание.

Принципиально, пенорезину получают следующим образом: латексную смесь подвергают вспениванию, вводят желатинирующий агент (наиболее часто используется кремнефтористый натрий), заливают в формы или наносят на ткань, дестабилизируют дисперсную систему вода – каучук воздействием тепла или холода, вулканизируют пенорезину, промывают и высушивают. Вспенивание латекса производится механическим или химическим путем.

1.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕНОРЕЗИНЫ

Как уже указывалось, пенорезину изготавливают вспениванием латексной смеси с последующей вулканизацией пены. Существуют различные способы ее получения. Однако для всех этих способов одинаковыми являются основные стадии процесса, такие как приготовление латексной смеси с необходимыми ингредиентами, образование пены и ее отверждение, вулканизация изделий [1]. Различия в способах определяется методами ведения основных стадий процесса. В основном, существуют три способа: способ Данлопа, способ Талалая, инжекционный процесс.

В основе способа Данлопа [2 – 5] лежит механическое вспенивание латексной смеси во вспенивателях периодического или непрерывного действия с отверждением пены за счет действия желатинирующих добавок. Схема изготовления пенорезины по способу Данлопа представлена на рис. 1.

Вспенивание латекса производится во вспенивателе производительностью до 20 л/мин при скорости вращения ротора 100...400 об/мин. Желатинирование происходит в формах, нагретых до 40...50 °С, с использованием желатинирующих агентов кремнефтористого натрия, цинкоаммиаческого комплекса, нитропана и других веществ. Продолжительность желатинирования может регулироваться в пределах 5 – 30 мин. Вулканизация проводится горячим воздухом при температуре 120...140 °С в течение одного часа или в среде пара при температуре 100 °С в течение 30 мин. После вулканизации формы охлаждают, вынимают из них изделия, которые затем промывают. После отмытки пенорезина сушится воздухом при температуре 60...80 °С в течение 24 – 36 часов.

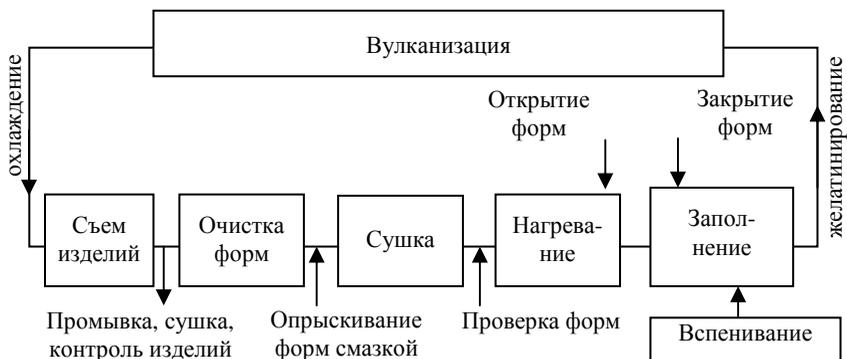


Рис. 1.1. Схема производства пенорезины по способу Данлопа

Способ Талалая [6 – 9] заключается во вспенивании латексной смеси комбинированным методом, т.е. первоначально получают пену низкой кратности 1,5 – 2 механическим способом, а затем уже в формах подвергают вакуумированию до требуемого значения кратности. После вакуумирования через форму продувают углекислоту, которая замораживает и желатинирует пену. Углекислота подается под давлением 0,7...1,4 Н/см² при температуре 32 °С. После желатинирования в циркуляционную линию внутри форм прекращается подача углекислоты, а вместо нее подают пар для вулканизации при температуре 110 °С. Полный цикл изготовления пенорезины по принципу Талалая составляет 30 – 38 мин.

Способ Талалая требует более сложного и дорогого оборудования по сравнению со способами Данлопа. Поэтому в отечественном производстве используют способ Данлопа.

Этот способ применяется при изготовлении рулонной (неформовой) пенорезины. Сохраняются процессы механического вспенивания латексной смеси до нужной кратности и ее желатинирования с помощью добавок. Таким способом получают изделия до 30 мм толщиной. Применяемое оборудование состоит из непрерывного вспенивателя, насоса подачи латекса, туннельной сушилки с вулканизационной камерой, моечно-отжимной установки и сушилки для промытой пенорезины.

В общем виде технологическую схему изготовления пенорезины можно представить структурной схемой, изображенной на рис. 1.2.

Начинается процесс с изготовления латексной пены во вспенивателе механического действия. Входными параметрами являются: объемное количество латексной смеси $V_{л}$ и воздуха $V_{в}$. Выходными параметрами – кратность пены "K" и ее физико-механические свойства, определяемые гидродинамической обстановкой в проточной части вспенивателя. Затем латексная пена поступает в агрегат желатинирования–вулканизации (АЖВ),

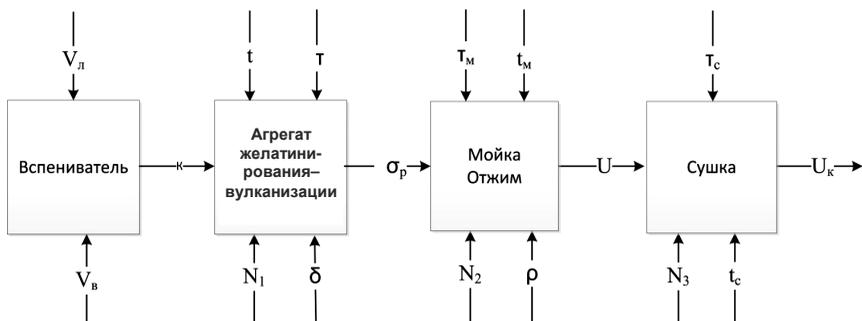


Рис. 1.2. Структурная схема изготовления пенорезины

где за счет теплового воздействия происходит формирование пенорезины. Входными параметрами являются: температура греющей среды t , способ подвода тепла N_1 , время τ , толщина изделия δ . Выходными параметрами: сопротивление пенорезины разрыву σ_p , твердость H , относительное удлинение ε . Из АЖВ пенорезина направляется в моечную машину валкового типа, где она проходит ряд валков, посредством которых из нее вынимается влага вместе с механическими и растворенными примесями. Качество мойки зависит от усилий на отжимных валках p , температуры воды, числа пар валков N_2 , времени нахождения пенорезины в воде τ_m . Эти параметры являются входными. Выходной параметр – влагосодержание пенорезины U .

После мойки и отжима пенорезина поступает в сушильную камеру, где входными параметрами являются: температура сушки t_c , время сушки τ_c и способ подвода тепла N_3 . Выходной параметр – конечное влагосодержание U_k готового изделия.

На основе структурной схемы разработана математическая модель процесса, устанавливающая связь между входными и выходными параметрами. Эта связь выражается в виде уравнений различного типа с наложенными на процесс ограничениями. Математическая модель позволяет найти оптимальный вариант разрабатываемого оборудования или оптимизировать технологический процесс.

Анализ технологических схем изготовления пенорезины показывает, что основными контролируемыми параметрами являются кратность пены и толщина ее слоя. Исходя из этого, необходимо установить зависимость указанных параметров от физико-химических свойств исходных материалов и условий ведения технологического процесса.

1.3. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВА ПЕНОРЕЗИНЫ

Как указано в монографии В.К. Тихомирова [10], получить пены можно двумя способами: диспергационным и конденсационным. Применительно к латексным пенам в настоящее время используется только первый способ.

Технологически диспергирование осуществляется в механических вспенивателях при действии движущихся устройств на латекс в присутствии воздуха, который подается при избыточном давлении.

Получение пен может быть обусловлено действием нескольких источников пенообразования одновременно. При этом отмечается, что процесс пенообразования крайне сложен из-за совместного влияния многочисленных физико-химических, физико-технических и других факторов. Множество переменных параметров крайне осложняет возможность математического описания протекающих процессов обычными методами математического анализа. Поэтому практика исследований в области пе-

нообразования носит эмпирический или полуэмпирический характер, а теоретические исследования ограничены рассмотрением лишь отдельных вопросов.

До настоящего времени нет единого универсального критерия пенообразования, который бы объективно оценивал все пенящиеся системы в любых условиях.

Однако имеется ряд основных свойств, которые характеризуют пенную систему:

1. Пенообразующая способность (вспениваемость). Она оценивается объемом пены или высотой столба, которые образуются из постоянного объема раствора при соблюдении определенных условий в течение данного времени.

2. Кратность пены – отношение объема пены к объему раствора, из которого она получена:

$$K = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{ж}}} = \frac{V_{\text{в}} + V_{\text{ж}}}{V_{\text{ж}}} = 1 + \frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{ж}}},$$

где $V_{\text{п}}$ – объем пены, м^3 ; $V_{\text{ж}}$ – объем раствора, м^3 ; $V_{\text{в}}$ – объем воздуха (газа), м^3 .

3. Стабильность (живучесть) пены, т.е. время существования элемента пены (отдельного пузырька, пленки) или определенного объема.

4. Дисперсность пены, которая характеризуется средним размером пузырька или распределением пузырьков по размерам.

5. Вязкость, теплопроводность, электропроводность пены.

Указанные свойства пен находятся в зависимости от условий пенообразования, свойств раствора, внешних факторов.

Схематично это показано на рис. 1.3.

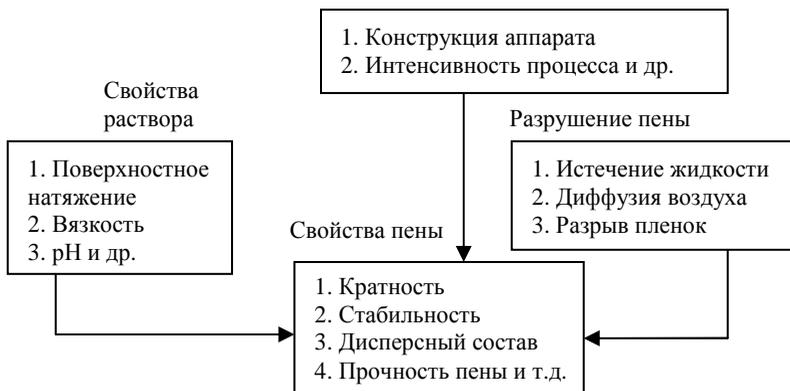


Рис. 1.3. Условия пенообразования

1.3.1. ПЛОТНОСТЬ И ДИСПЕРСНОСТЬ ПЕНОРЕЗИНЫ

Из всех механических свойств пен наиболее важна их относительная плотность. Этот параметр зависит от соотношения жидкой и газовой фаз и может колебаться в пределах от $0,5\rho_1$ (ρ_1 – плотность жидкой фазы) до значений, близких к нулю. Плотность пен является переменной величиной. Она уменьшается при разрушении пен, если преобладает процесс истечения междупеночной жидкости. Если скорость разрушения пленок значительно превышает скорость истечения, то плотность пен может даже несколько повыситься. Плотность пены связана с объемом газовой фазы [10, с. 31]:

$$V_{\Gamma} = 1 - \frac{\rho}{\rho_1}, \quad dV_{\Gamma} = -\frac{d\rho}{\rho_1}. \quad (1.1)$$

Уравнение состояния пены [10]

$$3P_a \Delta V + 2\sigma \Delta S = 0, \quad (1.2)$$

где P_a – атмосферное давление, Н/м²; ΔV – объем пузырьков, м³; σ – поверхностное натяжение, Н/м; ΔS – поверхность пленки жидкости, м².

Важным механическим свойством пен является их дисперсный состав. На дисперсность пен существенное влияние оказывают физико-химические свойства раствора (поверхностное натяжение, вязкость, концентрация ПАВ и т.д.), способ смещения фаз, конструкция вспенивателя и режим его работы. Интенсивность пенообразования зависит от развитости поверхности контакта жидкой и газовой фаз.

Более существенно влияние конструкции аппарата и режима ведения технологического процесса пенообразования. Одна из особенностей процесса работы аппаратов состоит в том, что в слое турбулентной пены происходит многократное обновление поверхности контакта фаз, т.е. продолжительность существования пузырька пены определяется сотыми долями секунды. Поэтому при расчетах истинной поверхности раздела фаз (или среднего диаметра пузырька) необходимо учитывать динамическое состояние пены с помощью коэффициента, характеризующего кратность обновления поверхности. Уравнения, описывающие зависимость поверхности контакта фаз от различных факторов, как правило, выводятся эмпирически и справедливы лишь для аппаратов данного типа.

Так для пен, применяемых для тушения пожаров, было показано [11], что с ростом кратности пены средний размер пузырьков уменьшается только в том случае, если одновременно значительно увеличивается и интенсивность перемешивания фаз, характеризующаяся перепадом давления.

Между размерами пузырьков и стабильностью пены имеется определенная связь. Для данной конструкции пенообразователя и условий получения пены существует определенный интервал размера пузырьков, обла-

дающих наибольшей стабильностью. Этот интервал сдвинут в сторону пузырьков меньшего размера, для получения которых необходимо затратить большую энергию, чем для получения крупных пузырьков.

Латексные пены обладают рядом специфических особенностей по сравнению со свойствами пен, рассмотренных выше. Эти свойства рассмотрены в работе [12].

В работе приведены результаты исследования влияния концентрации, поверхностного натяжения, вязкости на кратность, дисперсность и устойчивость пен. Пену получали в стакане объемом 0,75 л при помощи пропеллерной мешалки с числом оборотов $n = 12\ 000$ об/мин в течение 15 мин и температуре 20 °С.

Кратность пены определялась из соотношения

$$K = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{л}}} = \frac{V_{\text{п}} \gamma_{\text{л}}}{g_{\text{п}}}, \quad V_{\text{л}} = \frac{m_{\text{л}}}{\gamma_{\text{л}}}, \quad (1.3)$$

где $V_{\text{п}}$ – объем пены, м³; $V_{\text{л}}$ – объем латекса, м³; $\gamma_{\text{л}}$ – удельная масса латекса, кг/см³; $g_{\text{п}}$ – масса пены, кг.

Дисперсность пены определялась по фотографиям. Пена в этом случае помещалась между двумя стеклами при зазоре $\delta = 0,05$ мм и увеличении в 7 раз вместе со шкалой окуляр-микрометра. Диаметры полученных на фотографии пузырьков-цилиндров пересчитывались на соответствующие диаметры исходных сферических пузырьков по формуле:

$$d_{\text{ср}} = \frac{\sum d_i n_i}{\sum n_i}. \quad (1.4)$$

В работе [11] на примере пены, приготовленной из 1%-ного водного раствора смеси сульфанола НП-1 и тринатрийфосфата в весовом отношении 1:1 путем барботирования воздуха через раствор. Показано, что наиболее интенсивные изменения в дисперсном составе пены протекают в начальный момент после ее образования и только через 40...60 с изменение этих параметров становится близким к линейному.

В общем случае удовлетворительно описывает изменение дисперсного состава пены во времени уравнение вида $y = ax^b$, где a , b – коэффициенты.

В аэрозольных пенах характер изменения дисперсного состава несколько иной. Однако и в этом случае наибольшая скорость укрупнения пузырьков имеет место в первые минуты после приготовления пены [12], а через 15...20 мин укрупнение происходит по линейному закону.

Устойчивость пены к расслоению наблюдалась в течение 30 мин в специальной воронке с заплавленным нижним концом, в расширенную

часть которой помещался заданный объем пены. Определялось время τ до начала стекания пены в узкую калиброванную часть воронки, скорость ее стекания v_1 и скорость отслоения латекса v_2 .

Структурно-механические свойства пены изучались методом тангенциального смещения рифленной пластинки [13].

В результате проведенных исследований на латексе Л-4 было показано:

1. С разведением латекса уменьшается кратность и падает устойчивость пены.

2. Уменьшение кратности пены влияет на падение устойчивости пены (τ и v_2), но в меньшей степени, чем разведение латекса.

3. Понижение поверхностного натяжения σ до 40 дин/см приводит к увеличению кратности и повышению устойчивости пены. Дальнейшее уменьшение σ не влияет на эти свойства пены.

4. Наиболее существенно на свойства пены влияет вязкость:

– с увеличением вязкости наблюдается резко выраженный максимум и смещение его в сторону меньших диаметров пузырьков, т.е. пена из более вязкого латекса менее однородна, но более дисперсная;

– увеличение вязкости латекса приводит к упрочнению пленок пены и повышает ее устойчивость к разрушению.

Разрушение пузырьков воздуха на поверхности почти не наблюдалось.

5. Показатели устойчивости пены к расслоению (τ , v_1 , v_2) изменяются симбатно изменению свойств латекса, причем отслоение латекса из пены начинается одновременно со стеканием пены.

6. Для оценки отслоения латекса из пены после ее приготовления может служить величин τ .

7. В процессе старения латексные пены малой кратности переходят из вязкотекучего в структурированное состояние.

Вязкость пен проходит через минимум.

1.3.2. ПРОЦЕССЫ РАЗРУШЕНИЯ ПЕНОРЕЗИНЫ

Пена, как и любая дисперсная система, является агрегативно неустойчивой. Эта нестабильность объясняется наличием избытка поверхностной энергии, пропорциональной поверхности раздела жидкость–газ.

Известно, что замкнутая система, обладающая избытком свободной энергии, находится в неустойчивом равновесии, поэтому энергия такой системы всегда уменьшается. Этот процесс протекает до момента достижения минимального значения свободной энергии, при котором в системе наступает равновесие. Если такая система состоит из различных фаз, например жидкости и газа, как это имеет место в пенах, то минимальное

значение свободной энергии, а значит и поверхности раздела, будет достигнуто тогда, когда вся пена превратится в жидкость и газ.

Для изометрической системы из двух пузырьков радиусами r_1 и r_2 давление в них до и после слияния:

$$\Delta p_1 = \frac{2\sigma}{r_1}, \quad \Delta p_2 = \frac{2\sigma}{r_2}, \quad \Delta p_{12} = \frac{2\sigma}{r_{12}}, \quad (1.5)$$

где r_{12} – радиус пузырька после слияния двух, м.

Изменение свободной энергии Гиббса системы в этом процессе при постоянных давлении и температуре

$$dF = -SdT - PdV + \sigma dA, \quad (1.6)$$

где S – энтропия, Дж/К; T – температура, К; P – давление, Н/м²; V – объем, м³; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; A – удельная поверхность системы, м².

После подстановки в (1.6) значений из (1.5) [10, с. 60]

$$(\Delta F)_{V,T} = \frac{4}{3} \pi \sigma (r_{12}^2 - r_1^2 - r_2^2).$$

Поскольку в самопроизвольных процессах условием достижения устойчивого равновесия является $\partial F < 0$, то

$$r_{12}^2 < r_2^2 + r_1^2, \quad (1.7)$$

т.е. слияние двух пузырьков в один приводит систему в более равновесное состояние.

Разрушение пены происходит в результате истечения жидкости, диффузии газа между пузырьками и разрыва индивидуальных пленок внутри пены. Преобладание этого или иного из этих процессов при разрушении пены зависит от многих факторов. В очень стабильных пенах в первые 10...20 мин разрыв пленок не происходит. В пенах высокой кратности ("сухих"), а также пленок, образованных из вязких жидкостей, процесс истечения затруднен и распад обусловлен в основном диффузией газа. Пены с относительно жидкими прослойками, содержащими значительные количества жидкости, в первую очередь разрушаются в результате истечения жидкости, которое приводит к быстрому утончению пленок, лишь после этого в них начинает преобладать диффузия газа и разрыв пленок.

Для выражения вклада трех составляющих процесса разрушения пен в суммарный процесс Росс ввел величины L_l и L_g , обозначающие соответственно среднее время "жизни" жидкости и газа в пене [14].

$$L_l = \frac{1}{l_0} \int_0^{l_0} \tau dl, \quad L_g = \frac{1}{g_0} \int_0^{g_0} \tau dg, \quad (1.8)$$

где l_0, g_0 – начальные объемы жидкости и газа в пене; l, g – их объемы во время τ .

Однако эти величины не могут надежно характеризовать устойчивость пены в целом. Разрушение пены зависит от скорости конкурирующих явлений – истечения жидкости и разрыва пленок. Поэтому была введена величина, характеризующая среднее время "жизни" пены:

$$L_f = \frac{1}{f_0} \int_0^{f_0} \tau df = \frac{1}{f_0} \int_0^{\tau_k} f d\tau = \frac{1}{l_0 + g_0} \int_0^{\tau_k} l d\tau + \frac{1}{l_0 + g_0} \int_0^{\tau_k} g d\tau,$$

где f_0, f – начальный и общий объем пены во времени $\tau = 0$ и $\tau, f = l + g$, τ_k – время полного разрушения пены.

Среднее время "жизни" пены L_f всегда имеет промежуточное значение между L_l и L_g .

Для определения L_f, L_l и L_g необходимо фиксировать во времени уровень (в мерном цилиндре) межфазной поверхности – жидкость и пена – газ. По результатам строят график зависимости изменения объемов газа и жидкости в пене во времени. Площадь, ограниченная кривыми, дает значения L_l и L_g .

Истечение жидкости из пены происходит по каналам Плато под влиянием сил тяжести и капиллярных сил всасывания. Однако вклад гравитационных сил по сравнению с капиллярными пренебрежительно мал. В зависимости от стабильности пены истечение жидкости может происходить в результате выделения междупленочной жидкости и выделения жидкости стенками лопнувших пузырьков. В стабильных пенах пленки разрываются, как правило, лишь при достижении ими определенной толщины в результате предварительного истечения жидкости. Объем жидкости в таких утолщенных пленках весьма мал, вследствие чего доля объема жидкости, выделившейся за счет разрушения пленок, очень мала. В нестабильных пенах разрушение пленок имеет место еще до достижения ими критической толщины.

В начальный момент происходит истечение излишнего количества жидкости, заключенного между пузырьками. Это истечение представляет собой чисто гидродинамическое явление. Из всего объема пены раствор, содержащийся в прослойках, стекает вниз, подпитывая нижележащие слои пены. Истечение заканчивается, когда вся излишняя жидкость будет удалена и адсорбционные сольватированные слои пленок соединятся.

Далее начинается утончение адсорбционных слоев до состояния термодинамически неустойчивой пленки. На этой стадии истечение жидко-

сти из пены нельзя рассматривать и рассчитывать с точки зрения гидродинамики, так как становится существенным влияние капиллярных сил. Под их действием, обусловленным различной кривизной отдельных участков пленки пузырька, поверхностные слои пленок при истечении подвергаются упругим деформациям: они могут растягиваться или сжиматься в соответствии с направлением действующих на них усилий. При растягивании пленки молекулы поверхностного слоя ПАВ становятся менее плотно "упакованными", т.е. происходит локальное увеличение поверхностного натяжения. Однако проявляющийся эффект Марангони восстанавливает "ослабленный" участок. Эти два процесса протекают одновременно в течение всего периода существования пены вплоть до достижения пленками критической толщины, при которой они становятся хрупкими и могут разрываться при относительно слабом механическом воздействии, которое ранее они могли выдерживать. Причиной разрыва пленок могут оказаться вибрация, перепад температур, воздушные потоки, попадание частиц пыли и т.д. При истечении жидкости вблизи адсорбционных слоев пленки (второй этап истечения) скорость потока (как около твердых стенок) равна нулю, а в средней части она максимальна.

Большинство авторов для теоретического и экспериментального исследований истечения жидкости из пены используют физические модели этого явления. При этом скорость потока жидкости под действием гравитационных сил определяется по формуле Пуазейля:

$$U = \frac{\Delta p r^2}{8\mu l_\tau}, \quad (1.9)$$

где $\Delta p = p - p_\tau$ – разность давлений на концах капилляра, Н/м²; r и l_τ – радиус и длина капилляров в пене ко времени τ , м; μ – вязкость жидкости, Па·с.

Гиббс в работе [15], теоретически рассматривая истечение жидкости из свободной вертикальной пленки, сравнивал это явление с течением жидкости между двумя плоскими пластинами, расположенными параллельно и неподвижно относительно друг друга.

Им получено уравнение

$$U = \frac{\rho g \delta^2}{12\mu}, \quad (1.10)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; δ – толщина пленки, м.

Имеется еще ряд уравнений для описания этого процесса [16, 17], однако практического применения они не нашли из-за больших разбросов и трудности интерпретации физического смысла ряда констант, входящих в уравнения.

В работе [18] приведена формула для расчета объема вытекшей жидкости, удовлетворительно описывающая процесс:

$$V = U_{\Delta}^0 \left(\frac{\tau}{m\tau + 1} \right), \text{ м}^3 \quad (1.11)$$

где U_{Δ}^0 и m – эмпирические константы.

Все приводимые уравнения имеют определенные ограничения и зависят от принятой физической модели и условий эксперимента.

Так как пены со сферическими пузырьками практически всегда полидисперсные, давление в них не будет одинаковым. Разность давлений в пузырьках обуславливает диффузию газа из области высоких давлений (маленькие пузырьки) в область низких давлений (более крупные пузырьки).

Скорость диффузии пропорциональна разности давлений внутри пузырьков, а также проницаемости жидких пленок, разделяющих пузырьки различных размеров [19].

Де Фриз, применив к процессу переноса газа через пленку жидкости уравнение диффузии, вывел уравнение:

$$r_0^2 - r^2 = \frac{4RT}{P_a} \frac{DL\sigma}{\delta} (\tau - \tau_0), \quad (1.12)$$

где r_0 – начальный радиус пузырька, м; r – текущий радиус пузырька, м; D – коэффициент диффузии воздуха через пленку, м²/с; δ – толщина пленки, м; L – растворимость воздуха в жидкости, моль/л.

Однако расчеты по этому уравнению дают лишь ориентировочные значения величин ввиду ряда допущений, принятых при выводе этого уравнения. В действительности коэффициент диффузии не является постоянным из-за изменения структуры пленки. Кроме того, в полидисперсной пене имеется фракция пузырьков, размеры которых и количество остается постоянным (в пределах некоторого времени), несмотря на ход диффузии. Радиус пузырьков такой фракции Манегольд назвал критическим. Его значение лежит в пределах $r = 60 \dots 80$ мкм.

Изменение удельной поверхности раздела в пене удовлетворительно описывается уравнением:

$$\frac{S_0}{S_{\tau}} = 1 + k\tau, \quad (1.13)$$

где k – константа; S_0 – начальная поверхность раздела, м²; S_{τ} – поверхность раздела в момент τ , м².

1.3.3. РАЗРУШЕНИЕ ПЛЕНОК ПЕНЫ

В работе [19] процесс разрыва пленок разбит на три стадии: постоянное утончение всей пленки; скачкообразное появление отдельных участков меньшей толщины, чем толщина пленки, и последующее расширение этих участков меньшей толщины, чем толщина пленки, и последующее расширение этих участков; образование в пленке отверстия, расширяющегося с большой скоростью.

Теорию разрыва полимерных пленок разработал Де Фриз, по которой образование отверстия в пленке осуществляется с затратой некоторой энергии, так как при этом происходит увеличение поверхности раздела (особенно в начальный момент). Увеличение общей поверхности рвущейся пленки можно определить по уравнению [19, с. 78]:

$$\Delta S = \pi^2 \delta \left(r_{\min} + \frac{\delta}{2} - \frac{\delta}{\pi} \right) - 2\pi \left(r_{\min} + \frac{\delta}{2} \right)^2, \text{ м}^2, \quad (1.14)$$

где r_{\min} – наименьший радиус отверстия, м.

Максимальное увеличение поверхности раздела ΔS_{\max} достигается при

$$r = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \right) \delta, \\ \Delta S_{\max} = \left(\frac{\pi^3}{8} - \pi \right) \delta^2 \approx 0,73\delta^2. \quad (1.15)$$

Максимальное увеличение свободной поверхностной энергии при расширении отверстия или энергия активации составит:

$$\Delta A_{\max} = \sigma \Delta S = 0,73\delta^2 \sigma. \quad (1.16)$$

Из этого уравнения следует, что более важным параметром процесса разрушения является толщина пленки по сравнению с поверхностным натяжением. Поэтому вероятность разрыва более велика для пленок меньшей толщины. Энергия активации для пленок толщиной $\delta = 150 \text{ \AA}$ с поверхностным натяжением $\sigma = (30 \dots 40) \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ составляет значение порядка $5 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$. Пленки чистой жидкости могут иметь значительно меньшую толщину, соизмеряемую с размером молекул жидкости, поэтому самопроизвольное разрушение такой пленки невозможно предотвратить. Этим объясняется давно отмеченный факт, что пленки чистой жидкости нестабильны и неспособны образовывать устойчивые пенные структуры.

Разрушение пузырьков в столбе пены происходит после того, как закончатся процессы истечения и диффузии, а пленки достигнут критической толщины.

Изменение высоты столба пены по уравнению Манегольда [10, с. 81]

$$\frac{dh}{d\tau} = a(h - h_{n1}), \quad (1.17)$$

где h – высота столба пены ко времени τ , м; a – постоянная распада, 1/с; h_{n1} – высота столба между пленочной жидкости, м.

После интегрирования:

$$a = \frac{1}{0,4343\tau} \lg \frac{h_0 - h_{n1}}{h - h_{n1}}, \quad (1.18)$$

где h_0 – начальная высота столба пены, м.

Если заменить высоту столба пены и жидкости их объемами и пренебречь объемом жидкости в пене, то

$$0,4343a\tau = \lg \frac{V_0}{V}. \quad (1.19)$$

1.4. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕНОРЕЗИНЫ

В общем случае при исследовании пен требуется определить самые разнообразные ее характеристики с учетом влияния большого числа факторов. Применительно к изготовлению пенорезины из латекса наиболее важными с практической точки зрения являются кратность пены и ее дисперсность.

Дисперсность пены значительно влияет на физико-механические показатели готового изделия. При одной и той же кратности пены, но при различной дисперсности, свойства изделия могут существенно отличаться, например, по такому показателю, как твердость.

Кратность пены может определяться различными методами. Наиболее распространенными являются: объемный, изменение электропроводности пены, радиоактивный.

Самый простой и доступный метод определения кратности пены – объемный.

Кратность пены определяется из выражения

$$K = \frac{V_{п}}{V_{ж}}, \quad (1.20)$$

где $V_{п}$ – объем пены, м³; $V_{ж}$ – объем жидкости в пене, м³.

Объем жидкости можно определить по формуле

$$V_{\text{ж}} = \frac{m_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}, \quad (1.21)$$

где $m_{\text{ж}}$ – масса жидкости, кг; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³.

Пренебрегая массой воздуха в пене из-за малого давления его в пузырьках, можно записать:

$$K = \frac{V_{\text{п}} \rho_{\text{ж}}}{m_{\text{ж}}}. \quad (1.22)$$

Второй метод основан на линейной зависимости кратности пены от отношения электропроводности жидкости и приготовленной из нее пены.

Третий метод требует использования источника радиоактивного излучения (цезий 137) и счетчика (сцинтиллятора). Как показывают исследования, существует зависимость интенсивности γ -излучения от кратности пены.

Для определения дисперсности пен существует несколько методов: микрофотографирование, метод ослабления светового потока и метод Б.В. Дерягина, основанный на измерении избыточного давления.

Метод микрофотографирования является основным для определения дисперсного состава. Применительно к латексным пенам он описан в работе [12]. Для оценки значимости результатов исследований используется среднее квадратичное отклонение σ и критерий Стьюдента t :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (1.23)$$

где \bar{x} – среднее значение наблюдаемой величины (математическое ожидание); n – число опытов.

Как показывают экспериментальные исследования и практика промышленного производства пенорезины, ее физико-механические свойства отличаются повышенными показателями (упругость, твердость, долговечность) при кратности пены в диапазоне $K = 3 \dots 4$ и более высоком значении монодисперсного состава при выходе пены из вспенивателя.

2. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛАТЕКСНОЙ ПЕНОРЕЗИНЫ

2.1. ВСПЕНИВАТЕЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕНОРЕЗИНЫ

Для получения различных изделий из пенорезины необходима операция получения пены из латекса. Как правило, она получается путем смешения латекса с воздухом в устройстве, называемом вспенивателем.

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". Основной частью вспенивателей являются вспенивающая головка и смеситель. На рисунке 2.1 представлена конструктивная схема вспенивающей головки фирмы "Oakes", а на рис. 2.2 – вспенивателя ВН-1.

Вспениватели работают непрерывно и предназначены для производства пены различной кратности с одновременным введением в пену дисперсий желатинирующего и вулканизирующего агентов.

Непрерывный вспениватель выполняет следующие технологические операции:

- дозирование смеси латекса и жидкого мыла (парафинат аммония, олеаткалия);
- смешивание дозируемого латекса и жидкого мыла с дозируемым количеством воздуха и вспенивание этой смеси;
- дозирование дисперсий желатинирующего и вулканизирующего агентов;
- смешивание пены с дисперсиями.

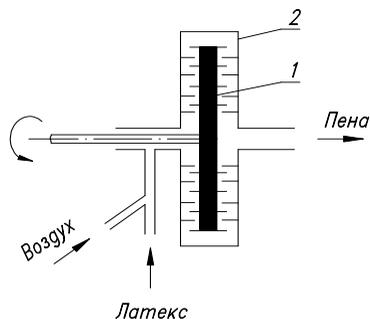


Рис. 2.1. Схема конструкции вспенивателя типа "Oakes":

1 – ротор; 2 – корпус

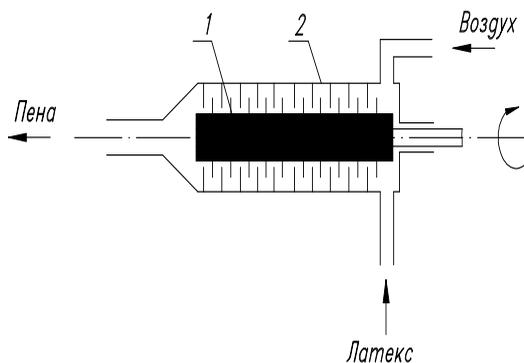


Рис. 2.2. Схема конструкции вспенивателя типа ВН-1:
1 – ротор; 2 – корпус

Вспенивающая головка фирмы "Oakes" состоит из корпуса, ротора и крышки. Внутренние поверхности корпуса, крышки и обе поверхности ротора снабжены концентрическими рядами шипов (выступов). Ротор устанавливается на вращающемся валу между корпусом и крышкой так, что между выступами в радиальном направлении имеет место зазор $\delta = 3,3$ мм. Этот зазор обеспечивает свободное вращение ротора.

Латексная смесь от латексного насоса с давлением $P = 3$ ат поступает через патрубок во вспенивающую головку в центре корпуса. К патрубку подводится и сжатый воздух. Латексно-воздушная смесь проходит между выступами корпуса и ротора, двигаясь от центра к внешней окружности корпуса. Затем смесь течет между выступами крышки и ротора к центру крышки, откуда вытекает готовая латексная пена. Вращение ротора обеспечивает хороший сдвиг и смешение латекса с воздухом при их проходе через вспенивающую головку.

Процесс приготовления латексной пены непрерывный и автоматический, проводится в полностью закрытой системе под давлением. Воздух поступает от компрессора с давлением $8,75 \dots 10,5$ кг/см². Латекс подается во вспенивающую головку насосом объемного типа. Обычно используются поршневые, шестеренчатые или винтовые насосы. Дозирование желатинирующих агентов осуществляется насосами диафрагменными или винтовыми. Фирма "Oakes" выпускает вспениватели трех типоразмеров: модель 8М, модель 10М, модель 14М. Техническая характеристика этих вспенивателей представлена в табл. 2.1.

Вспенивающая головка фирмы "Eug-o-matic" и вспенивателя типа ВН-1 также представляет собой ротор, вращающийся в статоре с зазором. Особенность конструкции заключается в том, что латексно-воздушная смесь перемещается не в радиальном направлении, а в осевом, что уменьшает гидравлические потери при его работе.

2.1. Техническая характеристика вспенивателей

Наименование	Вспениватель "Oakes"		
	8М	10М	14М
Производительность, кг/ч	20...180	180...360	152...720
Масса, кг	315	675	810
Габариты, м ³	1,4	2,24	2,24

Ротор выполнен из нержавеющей стали с квадратными шипами на поверхности. Статор также выполнен из нержавеющей стали и снабжен такими же шипами на внутренней поверхности. При вращении ротора возникают режущие и сдвиговые движения шипов, что приводит к высокой турбулизации потока и хорошему смешению воздуха с латексом.

Латексный насос выполнен из нержавеющей стали.

На пульте управления установлены приборы, позволяющие контролировать и регулировать количество подаваемых компонентов. Для промышленного применения фирма выпускает вспениватели двух размеров. Стандартная модель обеспечивает получение пены в количестве 135...815 кг/ч.

В работе [20] описан вспениватель для непрерывного производства латексной пены. По конструктивному исполнению вспенивающей головки он идентичен вспенивателю ВН-1. Его техническая характеристика:

– производительность, кг пены/ч	150...600
– установленная мощность электродвигателей, кВт	3,2
– частота вращения ротора головки, об/мин	100...420
– производительность насосов, л/мин	
дисперсного	0,1...0,7
латексного	1,7...10
– давление воздуха у вспенивателя, кг/см ²	4...6
– кратность пены при производительности латексного насоса 8 л/мин	более 8,3
– расход охлаждающей воды, м ³ /ч	2
– габаритные размеры, мм	1890×1065×1375
– масса, кг	700

Анализ конструкций и работы вспенивателей показывает, что они имеют ряд существенных недостатков:

- большая металлоемкость вспенивателей и смесительной головки;
- трудность разборки при чистке;
- большой разброс по размерам воздушных пузырьков в пене;
- необходимость дополнительного насоса для прокачки латекса через вспениватель.

С целью ликвидации указанных недостатков была предложена и разработана конструкция вспенивателя на основе гидродинамической теории вихреобразования в проточной части устройств лабиринтного типа.

2.2. ВСПЕНИВАТЕЛЬ ЛАБИРИНТНОГО ТИПА

Идея использования вспенивателя лабиринтного типа основана на работах А.И. Голубева [21], посвященных разработке теории и конструкции лабиринтных насосов для химической промышленности.

Как указывалось выше, для получения качественной пены необходимо организовать наиболее интенсивную гидродинамическую обстановку в аппарате для смешения двух потоков жидкости, т.е. необходимо иметь максимальное число Рейнольдса. Большой 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 выступах ротора и 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.

Используя методику расчета лабиринтного насоса [21], можно определить основные габаритные размеры рабочих органов промышленного вспенивателя по исходным параметрам:

- производительность по латексу $Q = 0,05 \dots 0,25$ л/с,
- давление нагнетания $P_n = 3$ кг/см²,
- число оборотов вала $n = 3000$ об/мин.

Для вспенивателя с треугольным профилем нарезки резьбы ротора и втулки коэффициент напора $K = 2, 3, 4$.

Коэффициент быстроходности

$$n_s = 3,65 \frac{n \sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}} = \frac{3,65 \cdot 3000 \sqrt{0,25 \cdot 10^{-3}}}{30^{\frac{3}{4}}} = 13,5 .$$

Так как $n_s < 20$, применяется окончательная треугольная форма нарезки. Принимаем размеры рабочих органов: диаметр ротора (втулки) $d = 100$ мм; угол нарезки $\alpha = 60^\circ$. Величина проходной площади вспенивателя в поперечном сечении:

$$F = \frac{Q}{\eta_r \frac{v}{2} \operatorname{ctg} \alpha} = \frac{0,25 \cdot 10^{-3}}{0,4 \frac{15,7}{2} \operatorname{ctg} 60^\circ} = 1,38 \cdot 10^{-3},$$

$$V = \frac{\pi d n}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot 3000}{60} = 15,7,$$

где V – окружная скорость ротора, м/с; $\eta_r = 0,4$ – коэффициент увеличения.

Для треугольного профиля нарезки оптимальное соотношение высоты нарезки к шагу $\frac{h}{t} = 0,3$.

Число заходов принимаем $z = 12$.

Зазор между ротором и втулкой

$$\delta = (0,06 \dots 0,17)h = (0,06 \dots 0,17) \cdot 7,85 = 0,47 \dots 1,33 \text{ мм.}$$

Шаг между зубьями в поперечном сечении

$$t = \frac{\pi d}{z} = \frac{3,14 \cdot 100}{12} = 26,16 \text{ мм.}$$

Высота нарезки

$$h = 0,3t = 0,3 \cdot 26,16 = 7,85 \text{ мм.}$$

Длина ротора

$$L = \frac{\pi d g H}{kz \left(\frac{v}{2} - \frac{Q \operatorname{tg} \alpha}{F} \right)} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot 9,81 \cdot 30}{2,38 \cdot 12 \cdot \left(\frac{15,7}{2} - \frac{0,25 \cdot 10^{-3} \cdot \operatorname{tg} 60^\circ}{1,38 \cdot 10^{-3}} \right)} = 150 \text{ мм.}$$

Полезная мощность

$$N_{\text{п}} = \frac{\gamma Q H}{1000} = \frac{10^4 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 30}{1000} = 0,075 \text{ кВт.}$$

Конструкторская разработка такого вспенивателя представлена чертежом общего вида в прил. 1.

2.3. ПЕНООБРАЗОВАНИЕ В УСТРОЙСТВЕ ЛАБИРИНТНОГО ТИПА

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 или роста образования пузырьков и их размер определяются гидродинамическим фактором, геометрией рабочей поверхности устройства и параметрами работы вспенивателя. Поперечный разрез вспенивателя представлен на рис. 2.3.

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

$$\frac{dN_1}{d\tau} = za \operatorname{Re}, \quad (2.1)$$

где z – число заходов ротора; a – коэффициент равный 1, 1/с; Re – число Рейнольдса; τ – время пребывания латекса во вспенивателе.

$$\operatorname{Re} = \frac{d_{\text{пр}} \nu \rho}{\mu}, \quad (2.2)$$

где $d_{\text{пр}}$ – приведенный диаметр проходного сечения, м; ν – окружная скорость ротора, м/с; μ – динамический коэффициент вязкости латекса, Па·с; ρ – плотность латекса, кг/м³.

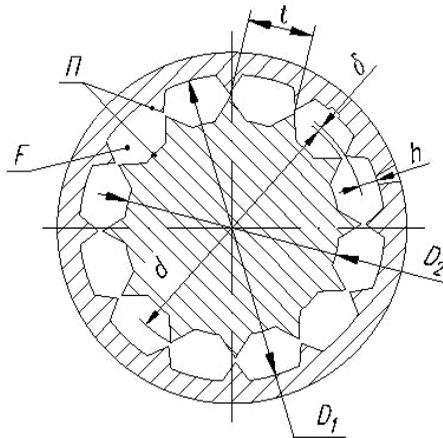


Рис. 2.3. Поперечный разрез вспенивателя лабиринтного типа

$$d_{\text{пр}} = 4R_2 ; \quad (2.3)$$

$$R_2 = \frac{F}{\Pi} , \quad (2.4)$$

где F – проходное сечение вспенивателя, м²; Π – периметр проходного сечения, м; R_2 – радиус гидравлический, м.

Подставляя (2.3) и (2.4) в (2.2), получим:

$$\text{Re} = \frac{4\nu F \rho}{\mu \Pi} . \quad (2.5)$$

При работе вспенивателя происходит как образование, так и разрушение пузырьков в результате их объединения, обусловленного разностью диаметров и внутренних давлений. Принимая такой механизм уменьшения количества пузырьков, будем считать, что число их определяется зависимостью

$$\frac{dN_2}{d\tau} = bN_1, \quad (2.6)$$

где b – коэффициент, 1/с.

Тогда количество образованных пузырьков

$$dN = dN_1 - dN_2 . \quad (2.7)$$

Из уравнений (2.1, 2.6, 2.7) определяем число пузырьков:

$$N = za \text{Re} \tau (1 - 0,5b\tau) . \quad (2.8)$$

В свою очередь число пузырьков в пене

$$N = \frac{3V_{\text{в}}}{4r^3\pi} , \quad (2.9)$$

где $V_{\text{в}}$ – объем воздуха в пене, м³; r – средний радиус пузырьков в пене, м.

В уравнении (2.9) выразим $V_{\text{в}}$ через кратность пены K , которая определяется выражением:

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

где $V_{\text{л}}$ – объем латекса, м³; $V_{\text{п}}$ – объем пены, м³.

Тогда

$$N = \frac{3V_{\text{л}}(K-1)}{4r^3\pi}. \quad (2.10)$$

Из уравнений (2.8) и (2.10) определяем радиус пузырьков:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3V_{\text{л}}(K-1)}{4\pi z a \operatorname{Re} \tau (1-0,5b\tau)}}. \quad (2.11)$$

Расход латекса при вспенивании

$$Q_{\text{л}} = \frac{V_{\text{л}}}{\tau}. \quad (2.12)$$

Линейная скорость вращения ротора

$$v = \frac{\pi d_{\text{ср}} n}{60}, \quad (2.13)$$

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

Подставим значение Re , v , $Q_{\text{л}}$ в (2.11) и получим

$$r = 1,045 \sqrt[3]{\frac{3Q_{\text{л}}(K-1)\Pi\mu}{z a d_{\text{ср}} n F(1-0,5b\tau)\rho}}, \quad (2.14)$$

где $\frac{\mu}{\rho} = \nu$ – кинематическая вязкость, $\text{м}^2 \cdot \text{с}$.

Смоченный периметр проходного сечения вспенивателя

$$\Pi = [\pi(D_1 + D_2) + 2t(2-z)], \quad (2.15)$$

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

В свою очередь

$$D_1 = d_{\text{ср}} + 2t; \quad (2.16)$$

$$D_2 = d_{\text{ср}} - 2t. \quad (2.17)$$

Подставим (2.16) и (2.17) в (2.15), тогда

$$\Pi = 2(\pi d_{\text{ср}} + 2t - tz). \quad (2.18)$$

Проходное сечение вспенивателя

$$F = \left[\frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) - 2fz \right], \quad (2.19)$$

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

Заменяем D_1 и D_2 через их значения. Получим:

$$F = \pi d_{\text{cp}} t - \frac{zt^2}{2} \sqrt{3}. \quad (2.20)$$

Подставим (2.18) и (2.20) в (2.14). Получим:

$$r = 1,045 \sqrt[3]{\frac{3Q_{\text{л}}(K-1)\mu(\pi d_{\text{cp}} + 2t - tz)}{z d_{\text{cp}} a n \rho (1 - 0,5b\tau) \left(\pi d_{\text{cp}} t - \frac{zt^2}{2} \sqrt{3} \right)}}. \quad (2.21)$$

Уравнение (2.21) позволяет сделать предварительный расчет среднего размера пузырьков в пене в зависимости от технологических параметров устройства и условий работы вспенивателя.

Преобразуем уравнение (2.21) применительно к конструкции лабораторного вспенивателя. Введем обозначения:

$$A = 3\mu(\pi d + 2t - tz),$$

где $t = 10$ мм, $z = 12$;

$$B = z d_{\text{cp}} \rho,$$

где $\rho = 1000$ кг/м³;

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

Тогда уравнение (2.21) примет вид:

$$r = \sqrt[3]{\frac{AQ_{\text{л}}(K-1)}{Bna(1-0,5b\tau)D}}. \quad (2.22)$$

Время нахождения латекса во вспенивателе

$$\tau = \frac{l}{U_{\text{п}}},$$

где $l = 80$ мм – длина ротора.

В свою очередь

$$U_{\Pi} = \frac{Q_{\Pi}}{F} \sin \alpha,$$

где $\alpha = 33^\circ$, $F = D$, тогда

$$\tau = \frac{0,08F}{Q_{\Pi} \sin 33^\circ} = \frac{0,08 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{Q_{\Pi} 0,54} = \frac{0,063 \cdot 10^{-4}}{Q_{\Pi}};$$

$$A = 3 \cdot 3 \cdot 10^{-4} (3,14 \cdot 0,04 + 2 \cdot 0,01 \cdot 12) = 0,22 \cdot 10^{-2};$$

$$B = 12 \cdot 0,04 \cdot 1000 = 480;$$

$$D = 3,14 \cdot 0,04 \cdot 0,01 - \frac{12 \cdot 0,01^2}{2} \sqrt{3} = 2,1 \cdot 10^{-4}.$$

Подставим численные значения параметров в (2.22) и получим:

$$r = \sqrt[3]{\frac{Q_{\Pi} (K-1) \cdot 10^{-2}}{an \left(1 - 0,063 \cdot 10^{-4} \frac{b}{Q_{\Pi}} \right)}}. \quad (2.23)$$

Значение коэффициента $b = 0,43$ определяется путем сравнения данных из экспериментов и получаемых из уравнения (2.23).

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕНООБРАЗОВАНИЯ ВО ВСПЕНИВАТЕЛЕ ЛАБИРИНТНОГО ТИПА

3.1. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ВСПЕНИВАТЕЛЯ ЛАБИРИНТНОГО ТИПА

Для проведения экспериментальных работ была изготовлена лабораторная установка по вспениванию латекса на основе лабиринтного насоса, схема которой представлена на рис. 3.1.

Основными рабочими элементами вспенивателя является ротор в виде винта и статор с внутренней винтовой нарезкой.

Ротор имеет левую треугольную нарезку с числом заходов 12. Наружный диаметр ротора $d = 40$ мм. Длина ротора $l = 80$ мм. Такое же число заходов и профиль нарезки имеет статор с правой нарезкой. Привод осуществляется от однофазного электродвигателя типа МСМ-0,2У мощностью 300 Вт и числом оборотов $n = 1400$ об/мин. Передача движения от электродвигателя ротору вспенивателя достигается посредством клиноременной передачи. Для изменения числа оборотов ротора на нем установлен разъемный шкив, позволяющий изменять его диаметр. Регистрация числа оборотов ротора измеряли тахометром. Расход жидкости через вспениватель определялся изменением его объема в мерном сосуде. Воздух во вспениватель подается от воздушного насоса через ротаметр, который определяет его расход.

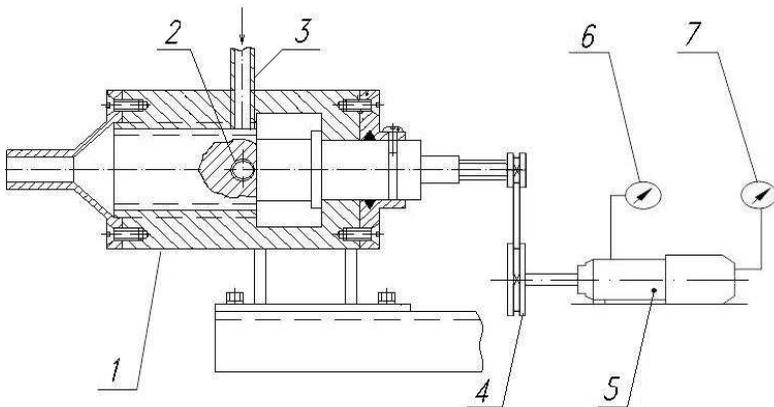


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки вспенивателя лабиринтного типа:

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

Все металлические детали вспенивателя выполнены из обычной конструкционной стали Ст3. Установка представлена на рис. 3.3, ротор – на рис. 3.2. Конструкция вспенивателя представлена в прил. 1.



Рис. 3.2. Ротор

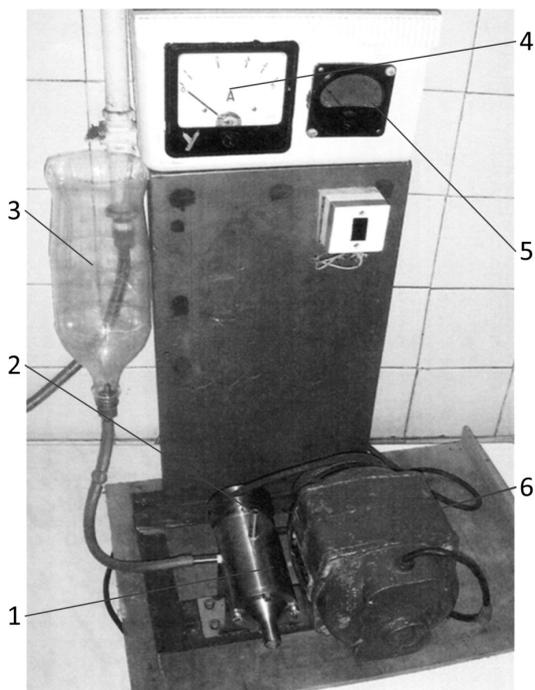


Рис. 3.3. Установка вспенивателя лабиринтного типа:
1 – вспениватель; 2 – штуцер подвода воздуха; 3 – емкость для латекса;
4 – амперметр; 5 – вольтметр; 6 – электродвигатель

3.2. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ВО ВСПЕНИВАТЕЛЕ ЛАБИРИНТНОГО ТИПА

Программа проведения научно-исследовательских работ предусматривает:

- а) проверку возможности применения вспенивателя лабиринтного типа в качестве латексного насоса;
- б) проверку возможности пенообразования необходимого качества;
- в) выяснение направления дальнейших научно-исследовательских и конструкторских работ для создания перспективного промышленного вспенивателя.

Исследования проводились на вспенивателе лабиринтного типа, сконструированном в виде лабораторной установки (рис. 3.3).

Наладка и обкатка конструкции производилась первоначально на воде. При этом проводили испытания на основные рабочие параметры и регулировку необходимых конструктивных и технологических параметров.

Методика проведения экспериментальных работ заключается в выполнении определенной последовательности операций, которые описаны ниже:

- заполняется емкость жидкостью;
- заполняется всасывающий шланг при открытом запорном устройстве на нагнетательном трубопроводе;
- перекрывается запорное устройство;
- всасывающий шланг опускается в емкость и включается электродвигатель;
- постепенным открытием и закрытием запорного устройства устанавливается работа вспенивателя как насоса;
- задается определенное число оборотов ротора;
- при заданном числе оборотов $n = \text{const}$ устанавливается различное положение запорного устройства;
- определяется производительность вспенивателя объемным способом, т.е. замеряется секундомером время наполнения жидкостью объема $W = 1$ л.

Расход равен

$$Q = \frac{W}{\tau},$$

где τ – время наполнения.

Первоначально были проведены испытания вспенивателя как насоса, чтобы определить его эксплуатационные характеристики.

Оценка качества пены, получаемой во вспенивателе лабиринтного типа, проводится по следующим параметрам: кратность, дисперсность и устойчивость к расслоению. Для определения дисперсности пена помещается между двумя параллельными стеклами [12]. При зазоре между ними

0,05 мм и фотографируется вместе со шкалой окуляр-микрометра при восьмикратном увеличении. Диаметры полученных на фотографии пузырьков – цилиндров пересчитывались на соответствующие диаметры исходных сферических пузырьков. Средний диаметр пузырьков вычислялся по уравнению:

$$d_{\text{cp}} = \frac{\sum d_i n_i}{\sum n_i},$$

где d_i – диаметр пузырька, м; n_i – количество пузырьков диаметра d_i .

По расчетным данным строится кривая распределения. Устойчивость пен к расслоению проводится замером времени оседания пены в мерном сосуде.

Соотношение между истинным диаметром пузырька и диаметром, определенным по фотографии, найдено следующим образом. Поверхность сферы $S_{\text{ш}} = 4\pi R^2$. Она равна поверхности кольца в результате деформации между стеклами:

$$S_k = \delta 2\pi R_1,$$

где δ – зазор между стеклами; R_1 – радиус кольца, м.

Тогда

$$4\pi R^2 = \delta 2\pi R_1,$$

откуда

$$R = \sqrt{\frac{\delta R_1}{2}}.$$

При зазоре $\delta = 0,05$ мм, $R = 0,122\sqrt{R_1}$; $d = 2R$.

Ввиду большого дефицита и большой емкости натурального латекса, основные эксперименты по вспениванию проводились на водном растворе сульфанола НП-1 и тринатрийфосфата в весовом соотношении 1:1.

Контрольный эксперимент проводился на латексе марки БС-50.

3.3. ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ВО ВСПЕНИВАТЕЛЕ ЛАБИРИНТНОГО ТИПА

Кроме способности вспенивать латекс конструкция вспенивателя позволяет транспортировать пену на последующую технологическую операцию. При этом он должен обладать необходимыми техническими характеристиками, которые определяются особенностями течения жидкости в его проточной части.

Передача жидкости от ротора к окружающей среде происходит в результате непрерывного возникновения, развития и отрыва вихрей, возникающих на выступах нарезок ротора и статора. Силовое взаимодействие

ротора и статора с жидкостью можно свести к напряжениям вихревого (турбулентного) трения на поверхности раздела между ротором и статором. Эти напряжения трения проявляются на выступах ротора и статора в виде сил давления и трения. При вихревом обтекании выступов и малой вязкости жидкости основную роль играют силы давления, перпендикулярные к поверхности выступов. Проекции этих сил на осевое направление определяют величину напора, создаваемого вспенивателем. Пренебрегая силами трения на поверхности ротора и статора ввиду малой вязкости жидкости, перепад давления на выступах ротора и статора, показанных на рис. 3.4 и 3.5, можно определить из выражения [21]

$$P = k\rho(V_{\text{н}} - U_{\text{н}})^2, \quad (3.1)$$

где k – коэффициент; ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ; $V_{\text{н}}$ – скорость жидкости, нормальная к поверхности нарезки, м/с ; $U_{\text{н}}$ – скорость жидкости в направлении, перпендикулярном поверхности выступа, м/с .

Коэффициент k при обтекании жидкостью тел с острыми краями в большом диапазоне изменения скорости обтекания не зависит от числа Рейнольдса, т.е. может считаться постоянным.

Для упрощения расчета принимаем, что ротор и статор вращаются с одинаковой окружной скоростью $V/2$ во взаимно противоположных направлениях. Здесь V – окружная скорость ротора:

$$V = \frac{\pi dn}{60}, \quad (3.2)$$

где d – диаметр ротора, м ; n – число оборотов ротора, об/мин .

В свою очередь

$$\begin{aligned} V_{\text{н}} &= \frac{V}{2} \cos \alpha; \\ U_{\text{н}} &= U_0 \sin \alpha; \\ U_0 &= \frac{Q}{F}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

где Q – расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; F – площадь проходного сечения вспенивателя, м^2 ; α – угол нарезки ротора и статора.

Подставим значения $V_{\text{н}}$ и $U_{\text{н}}$ в уравнение (3.1):

$$\begin{aligned} P &= k\rho \left(\frac{V}{2} \cos \alpha - \frac{Q}{F} \sin \alpha \right)^2 \quad \text{или} \\ P &= k\rho \left(\frac{\pi dn}{60} \cos \alpha - \frac{Q}{F} \sin \alpha \right)^2. \end{aligned} \quad (3.4)$$

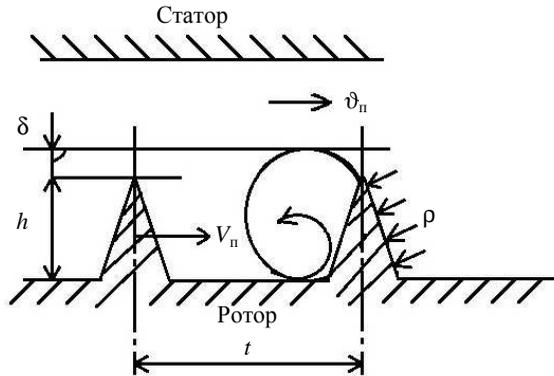


Рис. 3.4. Схема взаимодействия потока жидкости с выступами нарезок

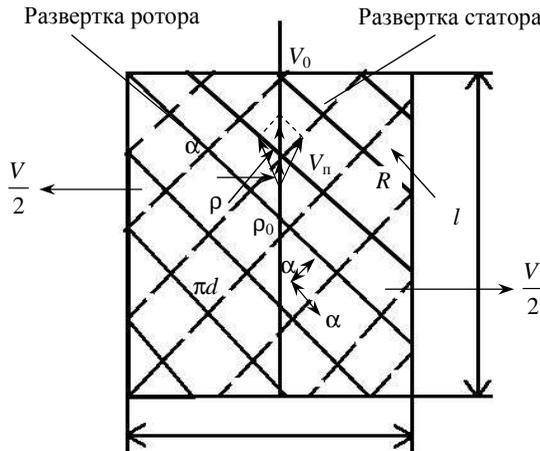


Рис. 3.5. Схема течения жидкости в проточной части вспенивателя

Перепады давления P определяют величину реакции R , действующей как со стороны выступов ротора, так и выступов статора на жидкость, расположенную в рабочем пространстве вспенивателя. Тогда общий перепад давления будет складываться из суммы проекций реакций каждой ячейки на ось ротора. Число ячеек m , которые укладываются на длине ротора l , определяется выражением:

$$m = \frac{lz}{s},$$

где s – шаг нарезки, m ; z – число заходов ротора и статора.

С другой стороны, $\frac{\pi d}{s} = \operatorname{tg} \alpha$,

откуда
$$m = \frac{lz \operatorname{tg} \alpha}{\pi d}. \quad (3.5)$$

Умножим ρ на m и получим выражение для перепада давления, определяемого обтеканием выступов ротора и статора с отрывом вихрей:

$$\Delta P = k\rho \frac{lz}{\pi d} \left(\frac{\pi dn}{120} - \frac{Q}{F} \operatorname{tg} \alpha \right)^2 \cos \alpha \sin^2 \alpha, \quad (3.6)$$

Напор, создаваемый вспенивателем:

$$H = \frac{\Delta P}{\rho g} = \frac{k_1 lz}{g d \pi} \left(\frac{\pi dn}{120} - \frac{Q}{F} \operatorname{tg} \alpha \right)^2, \quad (3.7)$$

где $k_1 = k \cos \alpha \sin^2 \alpha$.

Гидравлический момент, приложенный к ротору и втулке, определяется проекциями P сил реакции R . Осевая гидравлическая сила $P_0 = F \Delta P$. Тогда

$$P = P_0 \operatorname{ctg} \alpha = F \Delta P \operatorname{ctg} \alpha.$$

Мощность, расходуемая вспенивателем:

$$N = P \frac{V}{2} \quad \text{или}$$

$$N = F \Delta P \frac{V}{2} \operatorname{ctg} \alpha. \quad (3.8)$$

КПД вспенивателя:

$$\eta = \frac{Q \Delta P}{N} = \frac{Q}{F \frac{V}{2} \operatorname{ctg} \alpha}. \quad (3.9)$$

3.4. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВСПЕНИВАТЕЛЯ

В статье [22] представлена конструктивная схема вспенивателя лабиринтного типа и дана теория пенообразования в нем. Снятие рабочих характеристик вспенивателя, конструкция которого представлена на рис. 3.3 в разделе 3.1, проводилось путем его испытания на воде. Основные геометрические параметры рабочих органов: диаметр ротора – 40 мм, длина ротора –

80 мм, угол нарезки $\alpha = 33^\circ$. Привод ротора осуществляется от электродвигателя с числом оборотов $n_{\text{дв}} = 1360$ об/мин через клиноременную передачу, в которой шкив на роторе имеет разъемную конструкцию, позволяющую изменять число оборотов. Такая передача определяет следующие числа оборотов: 800 об/мин, 2312 об/мин, 2720 об/мин, 3260 об/мин. Зазор между ротором и статором равен 0,15 мм. Для определения мощности на валу электродвигателя снимались показания амперметра и вольтметра. Мощность определялась по формуле:

$$N_{\text{в}} = \frac{IV\sqrt{3} \cos \varphi}{1000},$$

где I – сила тока, А; V – напряжение, В; $\cos \varphi = 0,8$.

Производительность вспенивателя при различных числах оборотов определялась объемным способом. Для этого замерялось время τ заполнения емкости объемом 0,5 л. Производительность

$$Q = \frac{0,5}{\tau} \text{ л/с.}$$

Напор замерялся столбом воды в начальной линии, т.е. пьезометром. На рисунке 3.6 представлены основные характеристики вспенивателя, т.е. зависимость напора H , мощности и вакуумметрической высоты всасывания $h_{\text{вс}}$ от расхода.

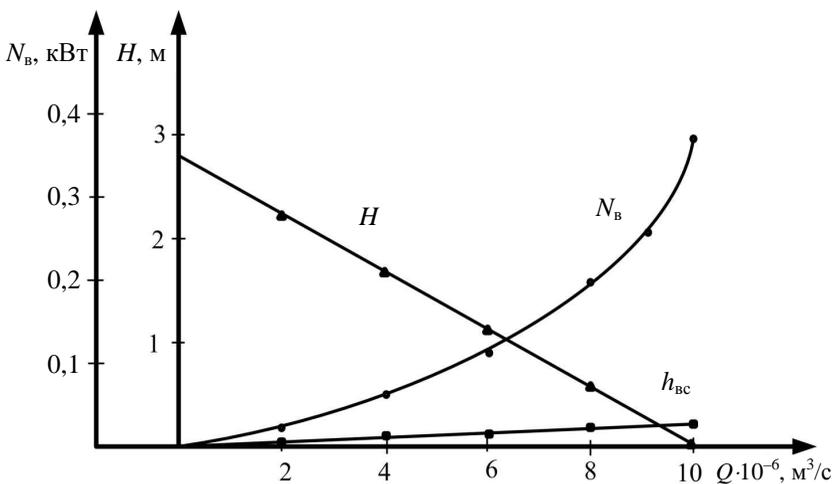


Рис. 3.6. Зависимость характеристик вспенивателя от производительности:
 H – величина напора; $N_{\text{в}}$ – расходуемая мощность;
 $h_{\text{вс}}$ – вакуумметрическая высота всасывания

На рисунке 3.7 представлена зависимость основных рабочих параметров (N_B , Q , H) от числа оборотов ротора.

При вспенивании в проточной части вспенивателя прогоняется двухфазный поток, физико-механические свойства которого будут отличаться от свойств однофазной жидкости.

В первую очередь изменится основной показатель потока его плотности, который определяет величину создаваемого напора.

Как известно, объем пены

$$V_{\Pi} = V_{\text{л}} + V_{\text{в}},$$

где $V_{\text{л}}$ – объем латекса, м^3 ; $V_{\text{в}}$ – объем воздуха, м^3 .

$$m_{\Pi} = m_{\text{л}} + m_{\text{в}},$$

где $m_{\text{л}}$ – масса латекса, кг; $m_{\text{в}}$ – масса воздуха, кг.

Плотность двухфазного потока (пены)

$$\rho_{\Pi} = \frac{m_{\Pi}}{V_{\Pi}} = \frac{m_{\text{л}} + m_{\text{в}}}{V_{\text{л}} + V_{\text{в}}} = \frac{m_{\text{л}}}{V_{\text{л}} + V_{\text{в}}} + \frac{m_{\text{в}}}{V_{\text{л}} + V_{\text{в}}}. \quad (3.10)$$

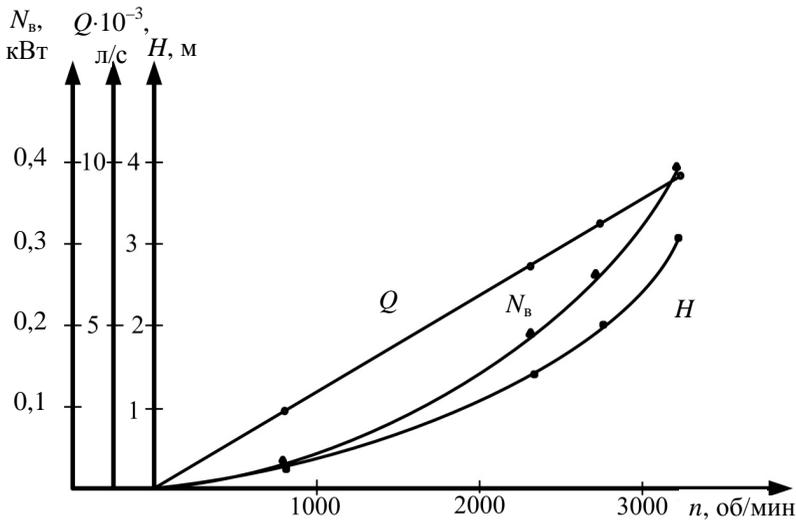


Рис. 3.7. Зависимость основных параметров вспенивателя от числа оборотов ротора

Кратность пены

$$K = \frac{V_{\Pi}}{V_{\text{л}}} = \frac{V_{\text{л}} + V_{\text{в}}}{V_{\text{л}}} = 1 + \frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{л}}}. \quad (3.11)$$

Разделим и умножим знаменатель уравнения (3.11) на $V_{\text{л}}$:

$$\rho_{\Pi} = \frac{m_{\text{л}}}{KV_{\text{л}}} + \frac{m_{\text{в}}}{KV_{\text{л}}} = \frac{\rho_{\text{л}}}{K} + \frac{m_{\text{в}}}{KV_{\text{л}}}, \quad (3.12)$$

где $\rho_{\text{л}}$ – плотность латекса, кг/м³.

Распишем второй член уравнения (3.12):

$$\frac{m_{\text{в}}}{KV_{\text{л}}} = \frac{\rho_{\text{в}} V_{\text{в}}}{KV_{\text{л}}} = \frac{\rho_{\text{в}}}{K} \frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{л}}}. \quad (3.13)$$

Из уравнения (3.11)

$$\frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{л}}} = K - 1.$$

Подставим в (3.13) и получим:

$$\frac{m_{\text{в}}}{KV_{\text{л}}} = (K - 1) \frac{\rho_{\text{в}}}{K}.$$

Подставим в (3.12) и получим для плотности пены:

$$\rho_{\Pi} = \frac{\rho_{\text{л}}}{K} + (K - 1) \frac{\rho_{\text{в}}}{K} \quad \text{или} \quad \rho_{\Pi} = \frac{1}{K} [\rho_{\text{л}} + \rho_{\text{в}} (K - 1)]. \quad (3.14)$$

Тогда перепад давления [21] будет определяться выражением:

$$\Delta p = \frac{k_1 z l [\rho_{\text{л}} + \rho_{\text{в}} (K - 1)]}{K \pi d} \left(\frac{V}{2} - \frac{Q}{F_{\text{пр}}} - \text{tg} \alpha \right)^2, \quad (3.15)$$

где $k_1 = 0,3$ – коэффициент напора; z – число заходов ротора; l – длина ротора, м; d – диаметр ротора, м; V – окружная скорость ротора, м/с; Q – производительность, м³/с; $F_{\text{пр}}$ – проходное сечение вспенивателя, м²; α – угол нарезки.

Напор, развиваемый вспенивателем, определяется высотой водяного столба:

$$H = \frac{\Delta p}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} g} = \frac{k_1 z l [\rho_{\text{л}} + \rho_{\text{в}} (K - 1)]}{K \pi d g \rho_{\text{H}_2\text{O}}} \left(\frac{V}{2} - \frac{Q}{F_{\text{пр}}} - \text{tg} \alpha \right)^2. \quad (3.16)$$

Плотность латекса в среднем $\rho_{\text{л}} = 9800 \text{ кг/м}^3$, а воды $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ кг/м}^3$, плотность воздуха $\rho_{\text{в}} = 1,23 \text{ кг/м}^3$. При значениях $K = 2, 3, 4$ отношение

$$\frac{\rho_{\text{л}} + \rho_{\text{в}}(K-1)}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \approx 1.$$

Тогда напор вспенивателя с учетом кратности пены можно записать в виде:

$$H = \frac{k_1 z l}{\pi \rho d g} \left(\frac{V}{2} - \frac{Q}{F_{\text{пр}}} \text{tg} \alpha \right)^2. \quad (3.17)$$

Как показали экспериментальные исследования вспенивателя, при значениях $K = 2, 3$ и 4 величина напора удовлетворительно описывается выражением (3.17) при коэффициенте напора $k_1 = 0,3$. Процент отклонения теории от эксперимента не более 10%.

3.5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОТРАБОТКЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВСПЕНИВАТЕЛЯ

Испытания проводились на модельной жидкости, которая по своим физико-механическим свойствам (вязкость, концентрация, поверхностное натяжение) приближена к латексу. Основной жидкости является водная дисперсия муки с добавлением желатина. На рисунке 3.8 представлена рабочая характеристика вспенивателя для различной кратности пены.

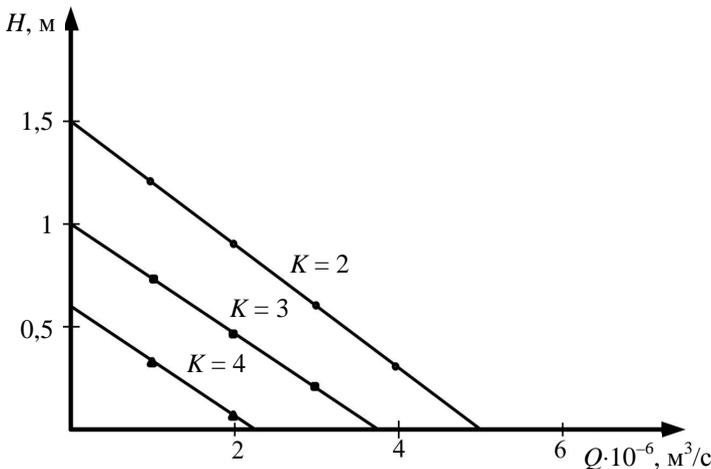


Рис. 3.8. Зависимость напора вспенивателя от производительности для различной кратности пены и числе оборотов $n = 3260 \text{ об/мин}$

Различная кратность пены создавалась путем открытия запорного устройства на подводе жидкости к вспенивателю. Воздух через всасывающий патрубок всасывался во вспениватель за счет образования вакуума при вращении ротора.

Кратность получаемой пены определялась объемным способом. Пенной заполнялась стеклянная емкость объемом $V = 200 \text{ см}^3$. После оседания пены до стабильной жидкости определялся ее объем. Отношение полученного объема пены к объему жидкости определяло ее кратность.

Как известно, самым важным механическим свойством пен [10] является их дисперсный состав, который оценивается средним диаметром пузырьков. Обычно размеры пузырьков образующейся пены имеют довольно широкий диапазон. Поэтому более точно характеристику пены дают кривые распределения пузырьков по размерам в зависимости от кратности пены.

Для определения дисперсности пены и среднего размера пузырьков, получаемых при различных режимах работы вспенивателя, использовался метод фотографирования образцов пены. Такие образцы готовились следующим образом. На стеклянную пластину наклеивался лист бумаги, в середине каждого вырезалось квадратное окно размером 25 мм^2 . Толщина листа определялась микрометром и равнялась $0,1 \text{ мм}$. После получения пены она наносилась на квадратное окно и прижималась другой стеклянной пластиной. После этого проводилось фотографирование фотоаппаратом Sony DSC-T9 с разрешающей способностью в 6 мегапикселей. Затем фотография была увеличена в 100 раз, полученное изображение распечатывалось на бумаге, которую обрабатывали, подсчитывая число и размеры пузырьков по фракциям. Подсчитывали и средний диаметр пузырьков. На основании этих данных был рассчитан коэффициент $b = 0,43$.

Расчеты среднего диаметра пузырьков пены [22] по уравнению (2.21) с коэффициентом $b = 0,43$ отличаются от экспериментальных значений не более чем на 10%.

На рисунке 3.9 представлен фрагмент фотографии пены при $K = 4$ и увеличении в 100 раз, а на рис. 3.10 – кривые распределения пузырьков по фракциям для различной кратности при одинаковом расходе $Q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ и числе оборотов ротора $n = 2312 \text{ об/мин}$.

Как показывают экспериментальные исследования по вспениванию, лабиринтный вспениватель обладает насосной характеристикой практически линейного характера, что позволяет в схеме получения пенорезины исключить применение латексного насоса. При этом зависимость напора от кратности пены носит обратно пропорциональный характер, что логично объясняется увеличением газовой составляющей в общем потоке жидкости через вспениватель (рис. 3.8) и не требует дополнительной подачи воздуха.

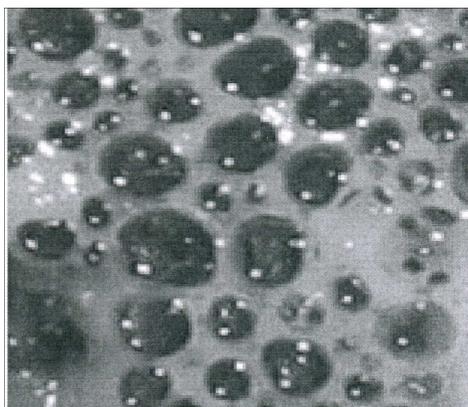


Рис. 3.9. Фрагмент фотографии пены при $K = 4$ и увеличении в 100 раз

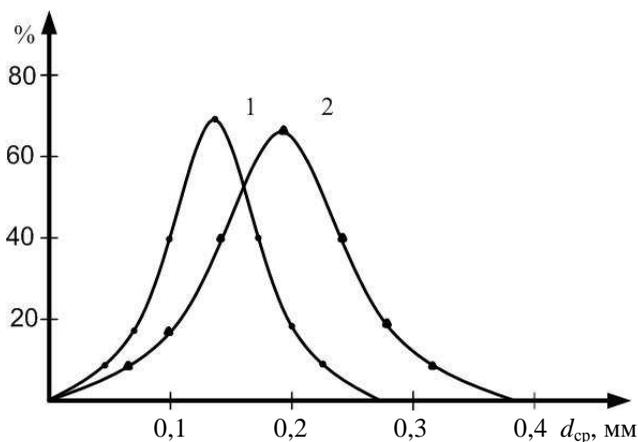


Рис. 3.10. Кривые распределения диаметров пузырьков в пене модельной жидкости при $Q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, $n = 3260 \text{ об/мин}$ и кратности:
1 – $K = 2$; 2 – $K = 4$

На рисунке 3.11 представлен график зависимости среднего диаметра пузырьков от кратности пены при различном числе оборотов и расходе при $Q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. Как видно из графика, наблюдается закономерность уменьшения диаметра пузырьков при увеличении числа оборотов. При этом с уменьшением числа оборотов характер этой зависимости приближается к линейному. Более наглядно это наблюдается на рис. 3.12, где представлена зависимость диаметра пузырьков от числа оборотов ротора и производительности при $K = 3$. При этом диаметр пузырьков уменьшается с уменьшением расхода латексной смеси.

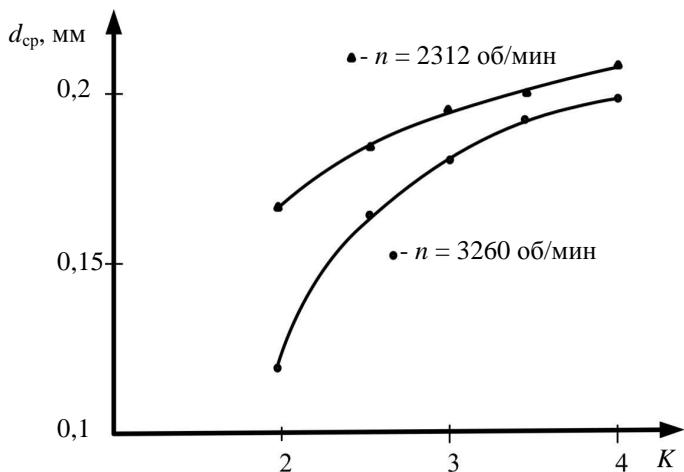


Рис. 3.11. Зависимость среднего диаметра пузырьков от кратности пены модельной жидкости при $Q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$

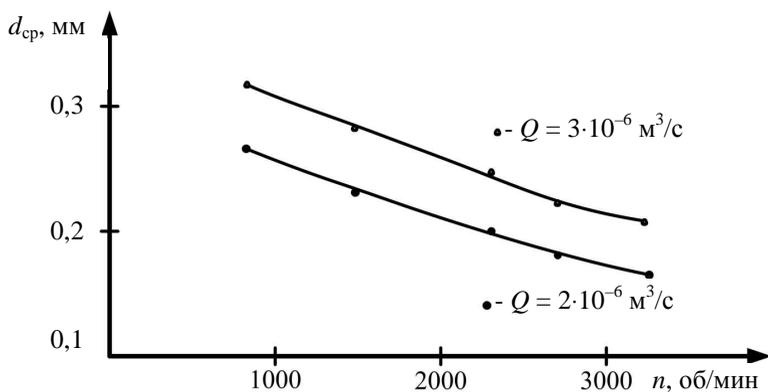


Рис. 3.12. Зависимость среднего диаметра пузырьков от числа оборотов вспенивателя модельной жидкости при $K = 3$

Характер распределения пузырьков в пене (рис. 3.10) носит закон нормального распределения случайных величин [23]. При этом значение среднего диаметра пузырьков приближается к значению математического ожидания этой величины.

Зависимость среднего диаметра пузырьков от производительности представлена на рис. 3.13.

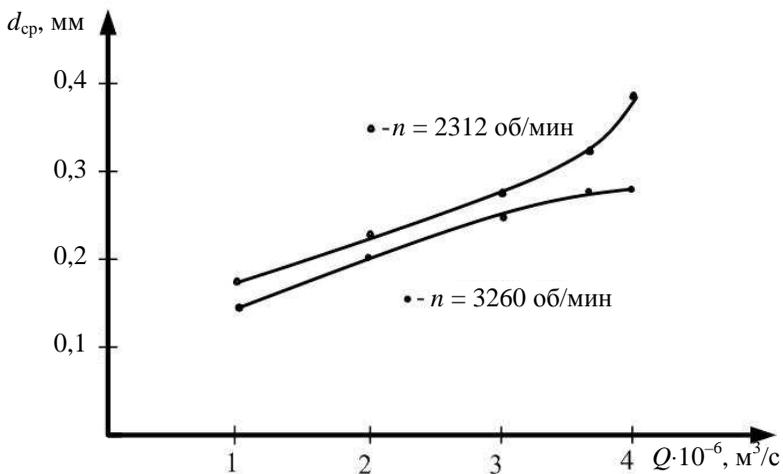


Рис. 3.13. Зависимость среднего диаметра пузырьков от производительности вспенивателя модельной жидкости при $K = 4$

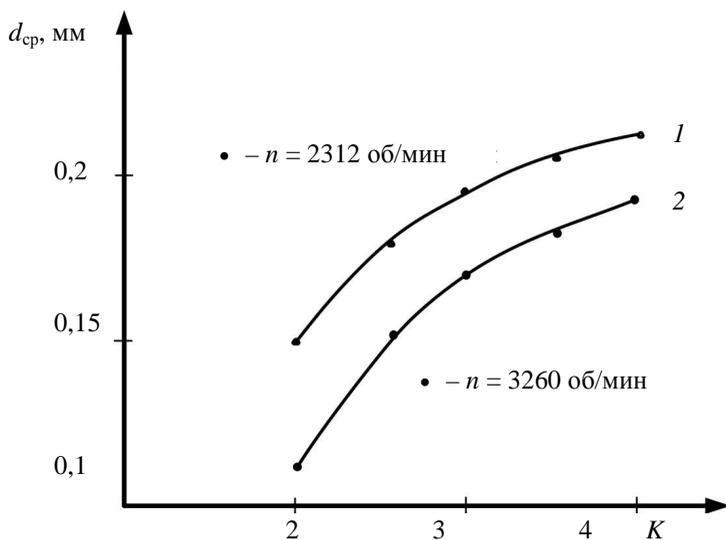


Рис. 3.14. Зависимость среднего диаметра пузырьков от кратности пены латекса марки БС-50 при $Q = 2 \cdot 10^{-6} m^3/c$

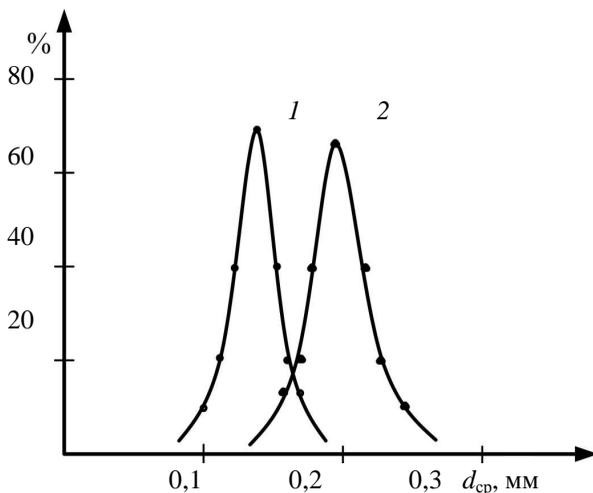


Рис. 3.15. Кривые распределения диаметров пузырьков в пене латекса марки БС-50 при $Q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, $n = 3260 \text{ об/мин}$ и кратности: $1 - K = 2$; $2 - K = 4$

Контрольные испытания пенообразующей способности вспенивателя проводились на латексе марки БС-50, имеющем следующие физико-механические показатели: концентрация каучука 50%, средний диаметр частиц латекса 0,1 мкм, натяжение 35 дин/см, вязкость 3,2 Па·с. Основные показатели модельной жидкости почти идентичны показателям латекса БС-50.

Эксперименты проводились при числах оборотов: 2312 об/мин, 3260 об/мин и кратности пены: $K = 2$ и $K = 4$, при производительности $Q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. Методика проведения экспериментов не менялась.

Результаты проведенных исследований представлены в виде графиков (рис. 3.14 и 3.15). Как видно из этих графиков, отличие значений среднего диаметра пузырьков от пузырьков при вспенивании модельной жидкости незначительно. Однако для латекса характерна более монодисперсная пена. При этом величина среднего диаметра пузырьков удовлетворительно описывается уравнением (2.21).

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

Кроме того, лабиринтный вспениватель можно применять и в противопожарной технике для подачи пены к очагу пожара.

3.6. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВСПЕНИВАТЕЛЯ ЛАБИРИНТНОГО ТИПА

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований работы вспенивателя рекомендуется следующий порядок расчета его основных параметров.

Требуется иметь данные для расчета, исходя из потребности конкретного производства, а именно: расход латексной смеси – Q , м³/с, кратность пены – K , число оборотов ротора – n , об/мин, напор – H , мм вод. ст.

На основании работ по исследованию лабиринтных насосов [21] 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.

Определим величину проходного сечения вспенивателя, задаваясь диаметром ротора d , по формуле

$$F_{\text{пр}} = \frac{Q}{\eta_{\text{T}} \frac{V}{2} \cos \alpha}, \quad V = \frac{\pi d n}{60},$$

где $\eta_{\text{T}} = 0,4 \dots 0,5$ – 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:

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

Проверяется значение проходного сечения вспенивателя по формуле:

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

где D и d – соответственно диаметры впадин статора и ротора, м; f – площадь сечения треугольной нарезки, м².

Предложенная методика расчета была использована для определения основных размеров и технической характеристики вспенивания применительно к эксплуатации в производственных условиях. Чертеж конструкции полученного вспенивателя приведен в прил. 2.

Причем конструкция ротора и статора выполнена в виде усеченных конусов, что позволяет обеспечить обслуживающему персоналу более легкую разборку вспенивателя из-за налегающего на рабочую поверхность коагулянта латекса.

3.7. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАБИРИНТНОГО ВСПЕНИВАТЕЛЯ

1. Предложена новая конструкция вспенивателя латексной смеси в производстве пенорезины, позволяющая объединить в одном устройстве как получение пены, так и ее транспортирование к последующей технологической операции.

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

3. Предложена методика получения пены во вспенивателе лабиринтного типа, которая в своей основе подтверждается результатами проведенных экспериментов.

4. На основе экспериментальных данных получена зависимость 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 моодисперсность, что позволяет иметь пенорезину с более высокими физико-механическими показателями.

6. Для всех режимов работы вспенивателя кривые распределения размеров пузырьков приближаются к закону нормального распределения с математическим ожиданием, определяющим средний размер пузырьков.

7. Предложена методика расчета вспенивателя, которая может быть использована при проектировании нового оборудования для получения пенорезины.

8. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований была разработана конструкция лабиринтного вспенивателя для промышленного производства.

4. ФОРМИРОВАНИЕ ПЕНОРЕЗИНЫ В АГРЕГАТЕ ЖЕЛАТИНИРОВАНИЯ И ВУЛКАНИЗАЦИИ

4.1. ЖЕЛАТИНИРОВАНИЕ ПЕНЫ

Как известно, латексная пена является полидисперсным телом, имеющим макропоры, размер которых увеличивается из-за слияния отдельных пузырьков между собой. Каркас латексной пены представляет собой микрокапиллярно-пористый материал. Процесс желатинирования пены происходит за счет действия коагулянтов, содержащихся в латексной пене, при нагреве.

Нагрев латексной пены происходит в агрегате желатинирования и вулканизации (АЖВ) горячим воздухом.

При желатинировании происходит уплотнение глобул каучука, выделение межглобулярной жидкости и образование поверхностной резиновой пленки [1, 24, 25]. После удаления в результате испарения основной массы влаги из пенорезины идет процесс вулканизации [26] при температуре ниже кипения. Такой температурный режим не позволяет оставшейся в пене влаги вскипать и приводить к браку изделия [27].

Процесс формирования пенорезины в агрегате желатинирования–вулканизации можно представить в виде двух стадий. На первой стадии при поступлении пены в АЖВ происходит нарастание температуры и удаление влаги из материала. Эту стадию можно описать системой уравнений связанного тепломассообмена (4.1) и (4.2) [39]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) - v \frac{\partial t}{\partial x} - \frac{r \partial u}{c \partial \tau}, \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + v \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\lambda \varepsilon}{\rho r'} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + \frac{\varepsilon c}{r'} v_x \frac{\partial t}{\partial x}. \quad (4.2)$$

Эта стадия длится до остаточной влажности порядка 5%, что указывает на завершение процесса желатинирования [28, 29]. После этого начинается вторая стадия процесса – вулканизация пенорезины. Аналитического решения подобная система уравнений не имеет. Поэтому решение сводится к численному методу. Для этого сделаем некоторые преобразования уравнений (4.1) и (4.2).

Введем обозначения:

$$f_1(x, y, \tau) = \frac{r'}{c} \left[a_m \left(\frac{\partial^2 u}{v x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + v \frac{\partial u}{\partial x} \right];$$

$$f_2(x, y, \tau) = -\frac{\lambda \varepsilon}{\rho r'} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\varepsilon c}{r'} v_x \frac{\partial t}{\partial x},$$

$$d = \left(a + \frac{\lambda \varepsilon}{\rho c} \right), \quad w = v(1 - \varepsilon).$$

С учетом введенных обозначений перепишем исходную систему уравнений:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = d \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) - w \frac{\partial t}{\partial x} - f_1(x, y, \tau); \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + v_x \frac{\partial u}{\partial x} + f_2(x, y, \tau), \quad (4.4)$$

где t – температура, К; x – координата по длине изделия, м; y – координата по толщине изделия, м; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; v – скорость движения изделия в направлении x , м/с; r' – теплота парообразования, Дж/кг; c – теплоемкость, Дж/(кг·К); u – влагосодержание, кг/кг; a_m – коэффициент влагопереноса, м²/с; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); ρ – плотность, кг/м³; ε – коэффициент фазового вращения.

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}.$$

Систему уравнений (4.3) и (4.4) дополним краевыми условиям первого рода:

$$t(x, y, 0) = t_0; \quad u(x, y, 0) = u_0;$$

$$t(0, y, \tau) = t_0; \quad u(0, y, \tau) = u_0;$$

$$t(l, y, \tau) = t_k; \quad u(l, y, \tau) = u_k;$$

$$t(x, 0, \tau) = t_0; \quad u(x, 0, \tau) = u_k;$$

$$t(x, l_2, \tau) = t_k; \quad u(x, l_2, \tau) = u_k.$$

Теплофизические компоненты принимаются на основе работ [30, 31]:

$$\begin{aligned}
 a &= a_0 + \alpha(t - 273); & a_0 &= 3,395 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}^2; & \alpha &= -0,11 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}^2; \\
 \lambda &= \lambda_0 + \beta(t - 273); & \lambda_0 &= 0,654 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); & \beta &= -0,152 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \\
 c &= c_0 + \gamma(t - 273); & c_0 &= 1076 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); & \gamma &= 2,374 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \\
 \rho &= 1000 \text{ кг}/\text{м}^3; & \varepsilon &= 0,8; & r' &= 2,52 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}; & v &= 0,2 \text{ м}/\text{с};
 \end{aligned}$$

$$a_m = 0,76 \cdot 10^{-11} \exp[(0,03348 + 04625u)(t - 50) + 11,5u] \text{ м}^2/\text{с}.$$

Значения краевых условий:

$$t_0 = 293 \text{ К}, \quad t_k = 373 \text{ К}, \quad u_0 = 0,8, \quad u_k = 0,2, \quad l_1 = 1 \text{ м}, \quad l_2 = 0,1 \text{ м}.$$

Для численного решения системы уравнений (4.3), (4.4) введем неравномерную сетку $\sum_{nx, my}^{kt}$:

$$x_0 = 0 \prec x_1 \prec x_2 \cdots \prec x_n = l_1;$$

$$y_0 = 0 \prec y_1 \prec y_2 \cdots \prec y_n = l_2;$$

$$\tau_0 = 0 \prec \tau_1 \prec \tau_2 \cdots \prec \tau_n = T$$

и обозначим:

$$h_i^x = x_i - x_{i-1}, \quad \text{сетка по оси } x, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n;$$

$$h_i^y = y_i - y_{i-1}, \quad \text{сетка по оси } y, \quad i = 0, 1, 2, \dots, m;$$

$$\Theta_j = \tau_j - \tau_{j-1}, \quad \text{сетка по оси } \tau, \quad j = 0, 1, 2, \dots, k.$$

Аппроксимируем на сетке $\sum_{nx, my}^{kt}$ дифференциальную задачу (4.3), (4.4) разностной с использованием неявной схемы на четырехточечном шаблоне. При этом производим расщепление каждого уравнения по методу А.А. Самарского [32].

Как указывалось выше, для получения качественной пенорезины необходимо иметь температуру в АЖВ меньше температуры парообразования влаги. При желатинировании пены в АЖВ наиболее часто используют горячий воздух с температурой около 100 °С. Как указывалось в работах [33, 34], парообразование не наблюдается при влажности 4...5%. Таким образом можно заключить, что процесс тепломассообмена, желатинирования пены заканчивается при указанной влажности. Затем температура ступенчато должна повышаться для вулканизации изделия.

Решение системы уравнений (4.3) и (4.4) проводилось на ЭВМ методом прогонки. На рисунке 4.1 представлены графические зависимости изменения влагосодержания и температуры в образце латексной пены от времени желатинирования. Анализ расчетных данных показывает заметное влияние скорости перемещения рулонной пены в камере АЖВ на распределение влагосодержания и температур. В случае стационарного режима, т.е. без учета скорости перемещения v в системе уравнений (4.3) и (4.4), расчетные данные расходятся с экспериментальными данными не более чем на 10%. Такую неточность можно объяснить переменными значениями теплофизических констант в процессе нагрева, так как точность их значений сильно зависит от рецептуры и латекса, применяемого для приготовления пенорезины.

Однако для предварительного расчета проектируемого агрегата желатинирования, изготовления конкретного изделия при известных теплофизических данных латексной пены предлагаемый метод может быть использован.

Из рисунка 4.1 для рассматриваемого случая можно определить длину участка желатинирования в камере АЖВ. Так, при скорости движения конвейера $v = 0,02$ м/с процесс желатинирования завершается за 120 с, и длина участка будет равна:

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

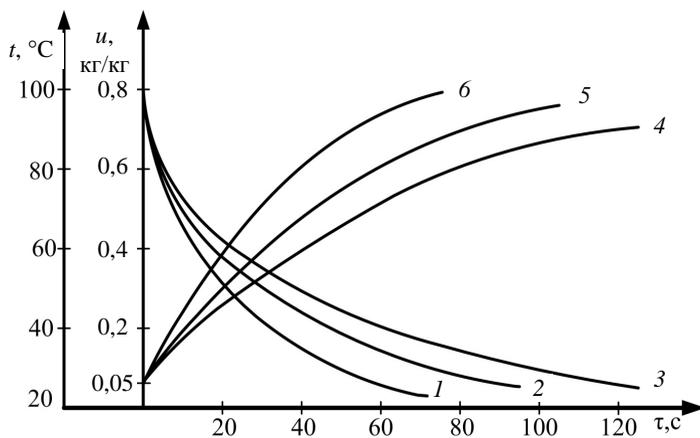


Рис. 4.1. Изменение влагосодержания и температуры пены при ее желатинировании в зависимости от времени:

1, 2, 3 – изменение влагосодержания в пене соответственно на подложке, в середине толщины и на поверхности пены;

6, 5, 4 – изменение температуры в аналогичных точках

Данная методика расчета длины участка желатинирования может быть использована при проектировании нового оборудования при определенных технологических параметрах и значениях теплофизических констант требуемой пены.

Для определения минимальной длины участка желатинирования необходимо решить задачу оптимизации режимных параметров процесса удаления влаги в камере АЖВ.

Постановка задачи оптимизации состоит в следующем: необходимо найти такие варьируемые параметры $\bar{x} = (\bar{t}, \bar{v})$, температуру t и скорость движения конвейера v в камере желатинирования, чтобы критерий оптимизации – длина участка желатинирования стремилась к минимуму.

$$L_{\text{ж}}(t, v) \longrightarrow \min \quad (4.5)$$

при выполнении условий (4.6) – (4.7):

– ограничение на заданное значение влагосодержания пены

$$u(t, v) = u_{\text{зад}}; \quad (4.6)$$

– ограничения на границы изменения варьируемых параметров

$$\begin{aligned} t_* \leq t \leq t^*; \\ v_* \leq v \leq v^*, \end{aligned} \quad (4.7)$$

где $u_{\text{зад}}$ – заданное значение влагосодержания пены, кг/кг.

Так, в результате решения поставленной задачи оптимизации с использованием системы уравнений (4.3), (4.4) получены минимальное значение длины участка желатинирования $L_{\text{ж}} = 2,4$ м, значения оптимальных параметров температуры в камере и скорость движения конвейера, соответственно $t = 85$ °С, $v = 0,025$ м/с при $u_{\text{зад}} = 0,045$ кг/кг, начальные значения температуры в камере и скорость движения конвейера, соответственно $t_0 = 80$ °С, $v_0 = 0,015$ м/с, $t_* = 25$ °С, $t^* = 100$ °С, $v_* = 0,001$ м/с, $v^* = 0,03$ м/с, $t_{\text{окр.ср}} = 20$ °С, $\gamma = 2,374$ Дж (кг·К), $\rho = 1000$ кг/м².

4.2. ВУЛКАНИЗАЦИЯ ПЕНОРЕЗИНЫ

Вулканизация является завершающим процессом в агрегате желатинирования–вулканизации [35 – 54]. Длину участка вулканизации можно рассчитать, используя закономерность изменения температуры при вулканизации, на примере решения задачи нестационарной теплопроводности, описываемой уравнением (4.5).

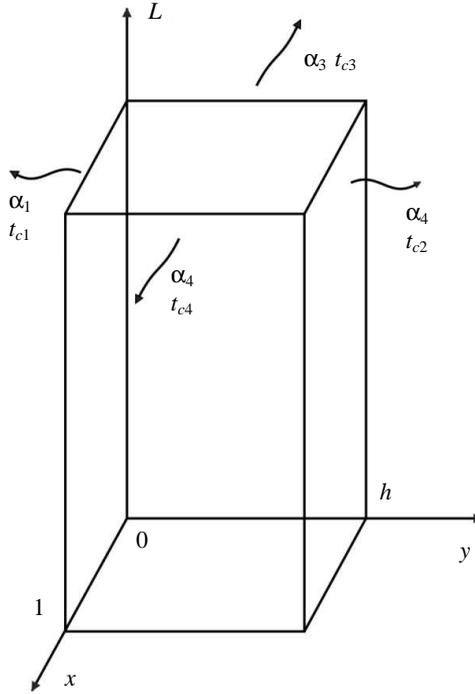


Рис. 4.2. Неограниченный брус

Показано применение методики решения нестационарной задачи теплопроводности для неограниченного бруса (рис. 4.2) с произвольным начальным распределением и неоднородными несимметричными граничными условиями 3-го рода на боковых поверхностях.

Нестационарное температурное поле в неограниченном бруске прямоугольного поперечного сечения описывается решением следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial t(x, y, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right), \quad (4.8)$$

$$0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq y \leq h, \quad \tau > 0;$$

$$t(x, y, 0) = f(x, y); \quad (4.9)$$

$$\lambda \frac{\partial t(0, y, \tau)}{\partial x} - \alpha_1 (t(0, y, \tau) - t_{c1}) = 0; \quad (4.10)$$

$$\lambda \frac{\partial t(l, y, \tau)}{\partial x} + \alpha_2 (t(l, y, \tau) - t_{c2}) = 0; \quad (4.11)$$

$$\lambda \frac{\partial t(x, 0, \tau)}{\partial y} - \alpha_3 (t(x, 0, \tau) - t_{c3}) = 0; \quad (4.12)$$

$$\lambda \frac{\partial t(x, h, \tau)}{\partial y} + \alpha_4 (t(x, h, \tau) - t_{c4}) = 0. \quad (4.13)$$

Здесь $t(x, y, \tau)$ – искомое температурное поле как функция поперечных координат бруса и времени; a, λ – соответственно коэффициенты теплопроводности и теплопроводности материала бруса; α_i, t_{ci} – соответственно коэффициенты теплоотдачи и температуры окружающей среды со стороны боковых поверхностей бруса.

Решение этой задачи целесообразно представить в виде суммы:

$$t(x, y, \tau) = P(x, y, \tau) + S(x, y) + t_{c1}, \quad (4.14)$$

причем $P(x, y, \tau)$ – решение нестационарной задачи с однородными граничными условиями, а $S(x, y)$ – решение стационарной задачи с неоднородными граничными условиями. Кроме того, для некоторого упрощения выражений решение задачи целесообразно искать относительно температуры окружающей среды со стороны одной из граней бруса.

$$\frac{\partial^2 S(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S(x, y)}{\partial y^2} = 0; \quad (4.15)$$

$$\lambda \frac{\partial S(0, y)}{\partial x} - \alpha_1 S(0, y) = 0; \quad (4.16)$$

$$\lambda \frac{\partial S(l, y)}{\partial x} + \alpha_2 (S(l, y) - T_{c2}) = 0; \quad (4.17)$$

$$\lambda \frac{\partial S(x, 0)}{\partial y} - \alpha_3 (S(x, 0) - T_{c3}) = 0; \quad (4.18)$$

$$\lambda \frac{\partial S(x, h)}{\partial y} + \alpha_4 (S(x, h) - T_{c4}) = 0, \quad (4.19)$$

где $T_{ci} = t_{ci} - t_{c1}. \quad (4.20)$

Для решения стационарной задачи используем метод конечных интегральных преобразований.

Для исключения координаты x используем интегральное преобразование вида:

$$U(y) = \int_0^l S(x, y) \rho(x) W(x) dx, \quad (4.21)$$

причем весовая функция $\rho(x) = 1$, а ядро интегрального преобразования $W(x)$ является решением вспомогательной задачи с однородными граничными условиями:

$$\frac{d^2 W(x)}{dx^2} + \mu^2 W(x) = 0; \quad (4.22)$$

$$\lambda \frac{dW(0)}{dx} - \alpha_1 W(0) = 0; \quad (4.23)$$

$$\lambda \frac{dW(l)}{dx} + \alpha_2 W(l) = 0. \quad (4.24)$$

Решение ищется с точностью до постоянного множителя в виде:

$$W(x) = \sin(\mu x + \varphi), \quad (4.25)$$

причем числа μ и φ определяются из граничных условий (4.23), (4.24):

$$\varphi = a \operatorname{tg} \left(\frac{\lambda \mu}{a_1} \right); \quad (4.26)$$

числа μ определяются как последовательные положительные корни уравнения:

$$\alpha_2 \sin(\mu l + \varphi) + \lambda \mu \cos(\mu l + \varphi) = 0. \quad (4.27)$$

Обратный переход выполняется по стандартной формуле:

$$S(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U(y) W(x)}{N}, \quad (4.28)$$

где

$$\begin{aligned} N &= \int_0^l \rho(x) W^2(x) dx = \int_0^l \sin^2(\mu x + \varphi) dx = \\ &= \frac{1}{2\mu} (\mu l + \sin \varphi \cos \varphi - \sin(\mu l + \varphi) \cos(\mu l + \varphi)). \end{aligned} \quad (4.29)$$

Суммирование в (4.28) ведется по значениям μ_n .

Переходим к изображениям задачи (4.15) – (4.19).

$$\int_0^l \frac{\partial^2 S(x, y)}{\partial y^2} W(x) dx = \frac{d^2 U(y)}{dy^2}; \quad (4.30)$$

$$\int_0^l \frac{\partial^2 S(x, y)}{\partial x^2} W(x) dx = -\mu^2 U(y) + Q. \quad (4.31)$$

Тогда
$$\frac{d^2 U(y)}{dy^2} - \mu^2 U(y) + Q = 0; \quad (4.32)$$

$$\lambda \frac{\partial U(0)}{\partial y} - \alpha_3 U(0) = Q_1; \quad (4.33)$$

$$\lambda \frac{\partial U(h)}{\partial y} + \alpha_4 U(h) = Q_2, \quad (4.34)$$

где
$$Q = \frac{\alpha_2}{\lambda} T_{c2} W(l) = \frac{\alpha_2}{\lambda} T_{c2} \sin(\mu l + \varphi), \quad (4.35)$$

$$Q_1 = - \int_0^l \alpha_3 T_{c3} W(x) dx = \frac{\alpha_3 T_{c3}}{\mu} (\cos \varphi - \cos(\mu l + \varphi)); \quad (4.36)$$

$$Q_2 = \int_0^l \alpha_4 T_{c4} W(x) dx = \frac{\alpha_4 T_{c4}}{\mu} (\cos \varphi - \cos(\mu l + \varphi)). \quad (4.37)$$

Решением задачи (4.32) – (4.34) является функция

$$U(y) = A \operatorname{ch}(\mu y) + B \operatorname{sh}(\mu y) + \frac{Q}{\mu^2}. \quad (4.38)$$

A и B определяются из граничных условий (4.33) и (4.34):

$$B = \frac{Q_2 - \frac{Q}{\mu^2} \alpha_4 - \left(\frac{Q_1}{\alpha_3} - \frac{Q}{\mu^2} \right) (\lambda \mu \operatorname{sh}(\mu h) + \alpha_4 \operatorname{ch}(\mu h))}{\lambda \mu \left(1 - \frac{\alpha_4}{\alpha_3} \right) \operatorname{ch}(\mu h) + \left(\alpha_4 - \frac{\lambda^2 \mu^2}{\alpha_3} \right) \operatorname{sh}(\mu h)}, \quad (4.39)$$

$$A = \frac{Q_1}{\alpha_3} - \frac{Q}{\mu^2} - \frac{\lambda \mu}{\alpha_3} B. \quad (4.40)$$

Таким образом, все составляющие решения (4.28) задачи (4.15) – (4.19) полностью определены.

Другая составляющая решения (4.14) задачи (4.9) – (4.13), функция $P(x, y, \tau)$, является решением нестационарной задачи с однородными граничными условиями:

$$\frac{\partial P(x, y, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 P(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right), \quad (4.41)$$

$$0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq y \leq h, \quad \tau > 0;$$

$$P(x, y, 0) = f(x, y) - S(x, y) - t_{c1}; \quad (4.42)$$

$$\lambda \frac{\partial P(0, y, \tau)}{\partial x} - \alpha_1 P(0, y, \tau) = 0; \quad (4.43)$$

$$\lambda \frac{\partial P(l, y, \tau)}{\partial x} + \alpha_2 P(l, y, \tau) = 0; \quad (4.44)$$

$$\lambda \frac{\partial P(x, 0, \tau)}{\partial y} - \alpha_3 P(x, 0, \tau) = 0. \quad (4.45)$$

$$\lambda \frac{\partial P(x, h, \tau)}{\partial y} + \alpha_4 P(x, h, \tau) = 0. \quad (4.46)$$

Решение этой задачи может быть выполнено методом конечных интегральных преобразований по двум пространственным координатам как одновременно, так и последовательно.

В данном случае последний вариант предпочтительнее, так как для исключения координаты x может быть применено преобразование, использованное при решении стационарной задачи (4.15) – (4.19):

$$R(y, \tau) = \int_0^l t(x, y, \tau) \rho(x) W(x) dx. \quad (4.47)$$

Обратный переход выполняется по формуле:

$$t(x, y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R(y, \tau) W(x)}{N}, \quad (4.48)$$

где значение N определяется формулой (4.29).

Функция $W(x)$ является решением задачи (4.22) – (4.24).

Переходим к изображению задачи (4.41) – (4.46):

$$\frac{\partial R(y, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 R(y, \tau)}{\partial y^2} - \mu^2 R(y, \tau) \right), \quad (4.49)$$

$$R(y, 0) = F(y) = \int_0^l (f(x, y) - S(x, y) - t_{c1}) W(x) dx; \quad (4.50)$$

$$\lambda \frac{\partial R(0, \tau)}{\partial y} - \alpha_3 R(0, \tau) = 0. \quad (4.51)$$

$$\lambda \frac{\partial R(h, \tau)}{\partial y} + \alpha_4 R(h, \tau) = 0. \quad (4.52)$$

В свою очередь, задача (4.49) – (4.52) может быть решена с использованием конечного интегрального преобразования по координате y :

$$V(\tau) = \int_0^h R(y, \tau) v(y) Z(y) dy, \quad (4.53)$$

с весовой функцией $v(y) = 1$ и формулой обратного перехода:

$$R(y, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{V(\tau) Z(y)}{M}, \quad (4.54)$$

где

$$M = \int_0^h v(y) Z^2(y) dy. \quad (4.55)$$

Функция $Z(y)$ является решением вспомогательной задачи:

$$\frac{d^2 Z(y)}{dy^2} - \mu^2 Z(y) + \gamma^2 Z(y) = 0; \quad (4.56)$$

$$\lambda \frac{dZ(0)}{dy} - \alpha_3 Z(0) = 0; \quad (4.57)$$

$$\lambda \frac{dZ(h)}{dy} + \alpha_4 Z(h) = 0. \quad (4.58)$$

Решение этой задачи с точностью до постоянного множителя имеет вид:

$$Z(y) = \sin(\eta y + \phi), \quad (4.59)$$

где числа $\eta^2 = \gamma^2 - \mu^2$ и ϕ определяются из граничных условий (4.57) и (4.58):

$$\phi = \operatorname{atg}\left(\frac{\lambda\eta}{a_3}\right), \quad (4.60)$$

где a, η – последовательные положительные корни уравнения

$$\lambda\eta \cos(\eta h + \phi) + \alpha_4 \sin(\eta h + \phi) = 0. \quad (4.61)$$

Тогда

$$\begin{aligned} M &= \int_0^h v(y) Z^2(y) dy = \int_0^h \sin^2(\eta y + \phi) dx = \\ &= \frac{1}{2\eta} (\eta h + \sin(\phi)\cos(\phi) - \sin(\eta h + \phi)\cos(\eta h + \phi)). \end{aligned} \quad (4.62)$$

Переходим к изображению задачи (4.49) – (4.52).

$$\frac{dV(\tau)}{d\tau} + a\gamma^2 V(\tau) = 0, \quad (4.63)$$

$$V(0) = \int_0^h F(y) Z(y) dy = \int_0^h \int_0^l (f(x, y) - S(x, y) - t_{c1}) W(x) Z(y) dy dx. \quad (4.64)$$

Решение задачи (4.63) – (4.64) имеет вид:

$$V(\tau) = V(0) \exp(-a\gamma^2 \tau) = V(0) \exp(-a(\mu^2 + \eta^2)\tau). \quad (4.65)$$

Таким образом, решение задачи (4.8) – (4.13) имеет окончательный вид:

$$t(x, y, \tau) = t_{c1} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U(y)W(x)}{N} + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{W(x)Z(y)V(\tau)}{NM}. \quad (4.66)$$

Для расчета режима вулканизации проведен расчет изменения температуры по толщине пенорезины для случая, когда толщина $\delta = 40$ мм, ширина $b = 600$ мм. Ввиду того, что $b > \delta$, ведем расчет изменения температуры только по толщине пенорезины при теплофизических константах, представленных в программе расчета (прил. 3).

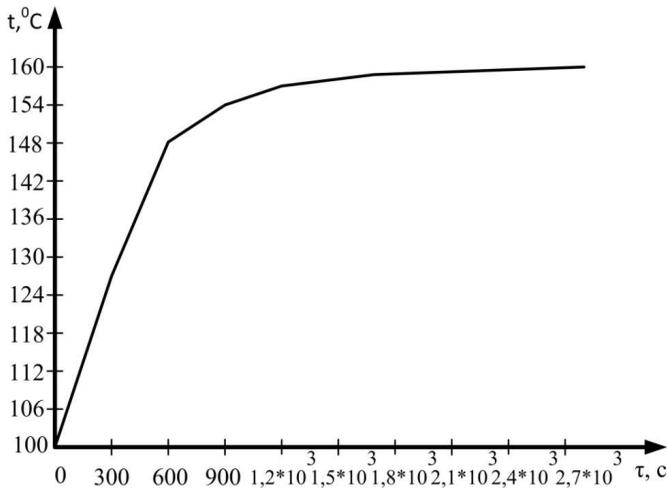


Рис. 4.3. Зависимость температуры заготовки от времени нагрева

В результате расчетов (рис. 4.3) получены данные температурного режима и времени его воздействия на пенорезину, позволяющие определить длину участка вулканизации для рассматриваемого случая. Из рисунка 4.3 определяем время вулканизации $\tau_b = 640$ с при скорости движения конвейера $v = 0,02$ м/с.

Длина участка вулканизации

$$L_b = \tau_b v = 640 \cdot 0,02 = 12,8 \text{ м.} \quad (4.67)$$

Общая длина агрегата желатинирования–вулканизации составит:

$$L_o = L_{\text{ж}} + L_b = 2,4 + 12,8 = 15,2 \text{ м.} \quad (4.68)$$

Таким образом, указанную систему уравнений можно использовать для расчета агрегата желатинирования–вулканизации применительно к размерам получаемого изделия.

5. ОТМЫВКА ПЕНОРЕЗИНЫ ОТ ПРИМЕСЕЙ

5.1. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОТМЫВКИ ПЕНОРЕЗИНЫ

Как следует из структурной схемы изготовления пенорезины, после агрегата желатинирования–вулканизации изделие подвергается мойке, отжиму и сушке. Мойка изделия от некаучуковых необходима для придания ему высоких санитарно-гигиенических свойств. В настоящее время мойка и отжим производятся в установках валкового типа [55], схема которой представлена на рис. 5.1.

Устройство работает следующим образом. Изделие 8 по рольгангу 3 подается в промывочную ванну 1, где в сжатом состоянии пропускается между промывными валками 2. Выходя из зева валков, изделие 8 под действием упругости расширяется и всасывает во все поры рабочую жидкость. После чего происходит отжим изделия валками 4. Отжатая жидкость собирается в ванне 5. Затем изделие перемещается во вторую промывную ванну 1. При выходе из второй промывной ванны 1 изделие подвергается снова отжиму, а затем направляется в сушильную камеру. Чередование промывных и отжимных пар валков с индивидуальными ваннами позволяет повысить кратность обмена рабочего состава и более активно удаляет загрязненную жидкость из изделия. Для транспортировки изделия используется рольганг 3. Прижим валков осуществляется гидropневматическим механизмом 6. Для осуществления промывки по принципу противотока промывные ванны 1 соединены трубопроводом через насос 7.

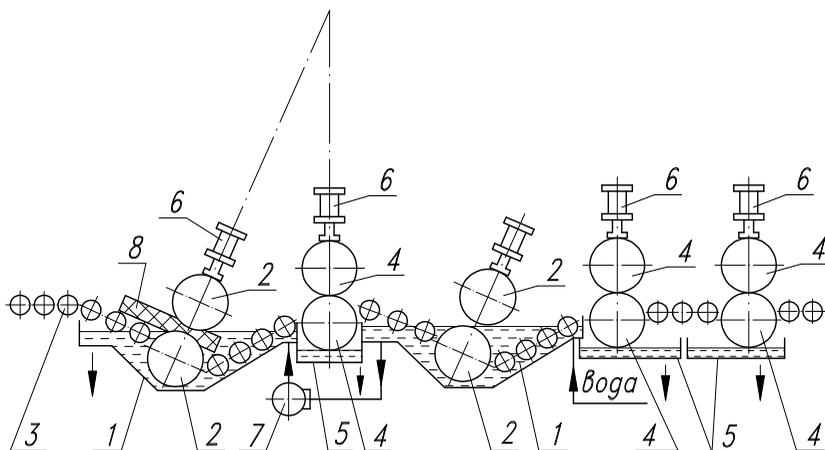


Рис. 5.1. Конструктивная схема валковой отжимной машины

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.

В связи с этим возникает необходимость дать математическое описание данного процесса, чтобы увязать параметры между собой.

5.2. ПРОЦЕСС ОТЖИМА ПЕНОРЕЗИНЫ В ВАЛКОВОЙ МАШИНЕ

Для мойки изделий из пенорезины применяют ванны с промывной водой и системой отжимных валков. Качество промывки и целостность изделий обеспечиваются определенными режимами, зависящими от условий движения изделия между валками, и течением влаги через поры пенорезины.

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

Пусть имеем два валка одинакового размера (рис. 5.2), между которыми движется влажная пенорезина и происходит ее отмыв. За бесконечно малое время dt пенорезина продвинется между валками на величину dx . При этом валками захватывается объем, равный

$$dV_0 = abdx, \quad (5.1)$$

где a – высота пенорезины, м; b – ширина пенорезины, м.

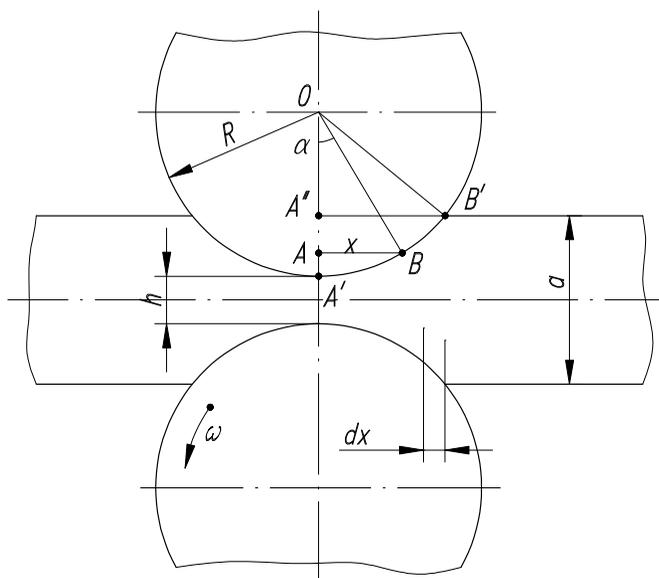


Рис. 5.2. Схема работы отжимных валов

За это же время из-под валков выйдет отжатый объем:

$$dV_k = bhdx, \quad (5.2)$$

где h – зазор между валками, м.

Принимая, что все поры заполнены водой, находим количество отжатой влаги:

$$dV_b = dV_0 - dV_k = b(a-h)dx. \quad (5.3)$$

Интегрирование уравнения (5.3) в пределах изменения x от нуля до $x = 2\pi R$ определяет объем влаги, отжимаемый за один оборот валков:

$$V_b = 2\pi Rb(a-h), \quad (5.4)$$

где R – радиус валков, м.

За число оборотов n соответственно:

$$V'_b = 2\pi Rb(a-h)n. \quad (5.5)$$

Расход влаги через поры пенорезины

$$Q = \frac{dV'_b}{dt} = 2\pi Rb(a-h) \frac{dn}{dt} \quad \text{или} \quad Q = 2\pi Rb(a-h)\omega, \quad (5.6)$$

где ω – угловая скорость вращения валков.

Скорость течения влаги в любом сечении при $0 < x < R$ в направлении оси x :

$$v = \frac{Q}{\sum f} = \frac{2bR(a-h)\omega}{n_{\Pi} r_{\Pi}^2}, \quad (5.7)$$

где $\sum f = \pi n_{\Pi} r_{\Pi}^2$ – живое сечение пор; n_{Π} – число пор в сечении; r_{Π} – средний радиус поры, зависящий от положения рассматриваемого сечения, т.е. $r_{\Pi} = f(x)$.

Пенорезина характеризуется такими показателями, как кажущаяся плотность γ_{Π} и пористость Π :

$$\gamma_{\Pi} = \frac{\gamma_p V_p}{V}, \quad \Pi = \frac{V_{\text{пор}}}{V}, \quad (5.8)$$

где γ_p – плотность пенорезины, кг/м³; V_p – объем резины в объеме пенорезины, м³; $V_{\text{пор}}$ – объем пор в объеме пенорезины, м³; $V = V_p + V_{\text{пор}}$ – объем пенорезины, м³.

Из (5.8) получается зависимость

$$\Pi = 1 - \frac{\gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{р}}}. \quad (5.9)$$

Будем считать [56], что объемная пористость равна поверхностной. Тогда в любом сечении пенорезины для наших условий

$$\Pi = \frac{\sum f}{a'b} = \frac{n_{\text{п}} \pi r_{\text{п}}^2}{a'b}.$$

Откуда

$$n_{\text{п}} r_{\text{п}}^2 = \left(1 - \frac{\gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{р}}}\right) \frac{a'b}{\pi}. \quad (5.10)$$

В свою очередь $a' = h + 2AA'$ и $AA' = R - \sqrt{R^2 - x^2}$.

Тогда

$$a' = h + 2 \left(R - \sqrt{R^2 - x^2} \right).$$

Подставим a' в (5.10), а (5.10) в (5.7) и получим выражение для скорости течения влаги через поры:

$$\vartheta = \frac{2\pi R(a-h)\omega}{\left(1 - \frac{\gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{р}}}\right) \left[h + 2 \left(R - \sqrt{R^2 - x^2} \right) \right]}. \quad (5.11)$$

Давление, возникающее в зазоре между валками при течении влаги, определим по известной формуле гидравлики [57]:

$$P = \xi(x) \rho \frac{\vartheta^2}{2}, \quad (5.12)$$

где ρ – плотность влаги, кг/м³; $\xi(x)$ – коэффициент местного сопротивления рассматриваемого сечения.

Если принять, что сжатая пенорезина состоит из большого набора перфорированных решеток и потеря давления в них происходит как для случая внезапного расширения, то $\xi(x)$ можно аппроксимировать в виде линейной функции

$$\xi = k' + c' \frac{x}{R}, \quad (5.13)$$

где k' , c' – константы.

Подставим (5.11) и (5.13) в (5.12) и получим:

$$P = \frac{\rho \left(k' + c' \frac{x}{R} \right)}{2} \left[\frac{2\pi R(a-h)\omega}{\left(1 - \frac{\gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{р}}} \right) \left[h + 2 \left(R - \sqrt{R^2 - x^2} \right) \right]} \right]. \quad (5.14)$$

Уравнения (5.11) и (5.14) показывают теоретическое распределение скорости и давления влаги в зазоре между валками при отжиме пено-резины. На рисунках 5.3 и 5.4 представлены графические зависимости распределения этих величин.

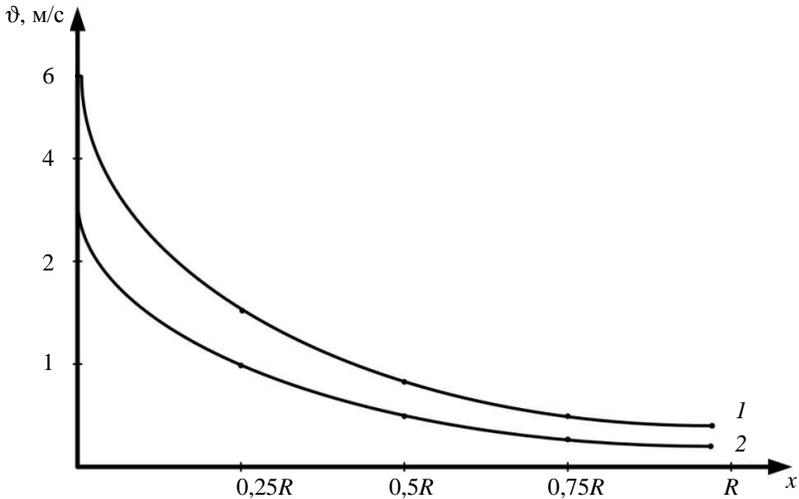


Рис. 5.3. Зависимость скорости движения влаги при различной угловой скорости валков от величины зазора между ними:

$$1 - \omega = 0,3 \text{ с}^{-1}; a = 0,05 \text{ м}; h = 0,005 \text{ м}; \frac{\gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{р}}} = 0,1; R = 0,3 \text{ м};$$

$$2 - \omega = 0,15 \text{ с}^{-1}; a = 0,05 \text{ м}; h = 0,005 \text{ м}; \frac{\gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{р}}} = 0,1; R = 0,3 \text{ м}$$

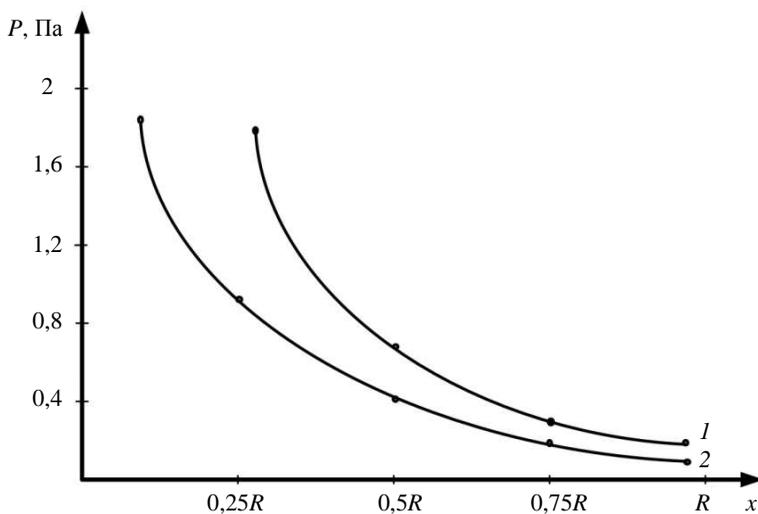


Рис. 5.4. Зависимость давления влаги от величины зазора между валками при различной угловой скорости валков:

$$1 - \omega = 0,3 \text{ с}^{-1}; a = 0,05 \text{ м}; h = 0,005 \text{ м}; \frac{\gamma_n}{\gamma_p} = 0,1; R = 0,3 \text{ м};$$

$$2 - \omega = 0,15 \text{ с}^{-1}; a = 0,05 \text{ м}; h = 0,005 \text{ м}; \frac{\gamma_n}{\gamma_p} = 0,1; R = 0,3 \text{ м}$$

Сила давления влаги на валок

$$P_c = \int_F PdF = bR \int_0^{\alpha_k} Pd\alpha, \quad (5.15)$$

где $F = bA'B'$ – площадь валка, на которую действует давление P ; $A'B'$ – дуга окружности валка.

$$dF = bRd\alpha.$$

Верхний предел интегрирования уравнения (5.15) определим:

$$\alpha_k = \arccos\left(1 - \frac{a-h}{2R}\right). \quad (5.16)$$

Подставим значение давления из уравнения (5.14) в (5.15) с учетом, что $x = R \sin \alpha$:

$$P = \frac{\rho}{2} \int_0^{\alpha_k} (k' + c' \sin \alpha) \left[\frac{2\pi R(a-h)\omega}{\left(1 - \frac{\gamma_{II}}{\gamma_p}\right) \left[h + 2R - 2\sqrt{R^2(1 - \sin^2 \alpha)} \right]} \right]^2 bR d\alpha ; \quad (5.17)$$

$$P = \frac{\rho [2\pi R(a-h)\omega]^2 bR}{2 \cdot \left(1 - \frac{\gamma_{II}}{\gamma_p}\right)^2 (h + 2R)^2} \left[\int_0^{\alpha_k} \frac{k' d\alpha}{(1 - A \cos \alpha)^2} + \int_0^{\alpha_k} \frac{c' \sin \alpha d\alpha}{(1 - A \cos \alpha)^2} \right],$$

где $A = \frac{2R}{h + 2R}$,

или
$$P = M \left[k' \int_0^{\alpha_k} \frac{d\alpha}{(1 - A \cos \alpha)^2} + c' \int_0^{\alpha_k} \frac{\sin \alpha d\alpha}{(1 - A \cos \alpha)^2} \right].$$

Рассмотрим интеграл

$$\int_0^{\alpha_k} \frac{d\alpha}{(1 - A \cos \alpha)^2} = \int_0^{\alpha_k} \frac{d\alpha}{(f - \cos \alpha)^2},$$

где $f = \frac{1}{A}$.

Сделаем подстановку:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = t, \quad d\alpha = 2 \frac{dt}{1+t^2}, \quad \cos \alpha = \frac{1-t^2}{1+t^2}.$$

Тогда

$$\int \frac{d\alpha}{(f - \cos \alpha)^2} = 2 \int \frac{dt(1+t^2)^2}{(1+t^2)[f(1+t^2) - (1-t^2)]^2} = 2 \int \frac{(1+t^2)dt}{a+bt^2+ct^4},$$

где $a = (f-1)^2 > 1$; $b = 2(f^2 - 1)$; $c = (f+1)^2$.

Так как корни уравнения $a + bt^2 + ct^4$ одинаковы из-за равенства 0, дискриминант $h = \sqrt{b^2 - 4ac} = c$, то его можно представить в виде равенства:

$$a + bt^2 + ct^4 = c \left(t^2 + \frac{f-1}{f+1} \right)^2,$$

где $\frac{f-1}{f+1} = P_1 = P_2$ – корень уравнения

$$P_1 = P_2 = -\frac{b}{2c} = -\frac{2(f^2 - 1)}{2(f+1)^2}.$$

Обозначим:

$$\sqrt{\frac{f-1}{f+1}} = B.$$

Тогда

$$\begin{aligned} 2 \int \frac{(1+t^2)dt}{c(t^2+B^2)} &= \frac{2}{c} \left[\int \frac{dt}{(t^2+B^2)^2} + \int \frac{t^2 dt}{(t^2+B^2)^2} \right] = \\ &= \frac{2}{c} \left[\frac{t}{2B^2(t^2+B^2)} + \frac{1}{2B^3} \operatorname{arctg} \frac{t}{B} - \frac{t}{2(t^2+B^2)} + \frac{1}{2B} \operatorname{arctg} \frac{t}{B} \right] = \\ &= \frac{2}{c} \left[\frac{t - Bt^2}{2B^2(t^2+B^2)} + \frac{1}{2B} \operatorname{arctg} \frac{t}{B} \left(\frac{1}{B^2} + 1 \right) \right] = \\ &= \frac{2}{c} \left[\frac{t(1-B)}{2B^2(t^2+B^2)} + \frac{(1+B^2)}{2B^3} \operatorname{arctg} \frac{t}{B} \right] = \\ &= \frac{1}{cB^2} \left[\frac{t(1-B)}{t+B^2} + \frac{(1+B^2)}{B} \operatorname{arctg} \frac{t}{B} \right]. \end{aligned}$$

$$\int \frac{\sin \alpha d\alpha}{(1 - A \cos \alpha)^2} = -\frac{c'}{A(1 - A \cos \alpha)},$$

тогда

$$P = M \left\{ k' \frac{1}{cB^2} \left[\frac{t(1-B)}{t^2 + B^2} + \frac{(1+B^2)}{B} \operatorname{arctg} \frac{t}{B} \right] - \frac{c'}{A(1-A \cos \alpha)} \right\};$$

$$P = M \left\{ \frac{k'}{cB^2} \left[\frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} (1-B)}{\left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^2 + B^2} + \frac{(1+B^2)}{B} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{B} \right] - \frac{c'}{A(1-A \cos \alpha)} \right\}_0^{\alpha_k}.$$

При $\alpha = 0$, $\operatorname{tg} 0 = 0$, $\operatorname{arctg} 0 = 0$

$$P = M \left[\left\{ \frac{k'}{cB^2} \left[\frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha_k}{2} (1-B)}{\left(\operatorname{tg} \frac{\alpha_k}{2} \right)^2 + B^2} + \frac{(1+B^2)}{B} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha_k}{2}}{B} \right] - \frac{c'}{A(1-A \cos \alpha_k)} + \frac{c'}{A(1-A)} \right\}_0^{\alpha_k} \right] =$$

$$= M \left[\left\{ \frac{k'}{cB^2} \left[\frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha_k}{2} (1-B)}{\left(\operatorname{tg} \frac{\alpha_k}{2} \right)^2 + B^2} + \frac{(1-B)}{B} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha_k}{2}}{B} \right] - \frac{c'}{A} \left(\frac{1}{1-A} - \frac{1}{1-A \cos \alpha_k} \right) \right\}_0^{\alpha_k} \right].$$

Интегрирование уравнения (5.17) приводит к зависимости:

$$P = M \left[\left\{ \frac{k'}{cB^2} \left[\frac{(1-B) \operatorname{tg} \frac{\alpha_k}{2}}{\left(\operatorname{tg} \frac{\alpha_k}{2} \right)^2 + B^2} + \frac{(1+B^2)}{B} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha_k}{2}}{B} \right] - \frac{c'}{A} \left(\frac{1}{1-A} - \frac{1}{1-A \cos \alpha_k} \right) \right\}_0^{\alpha_k} \right], \quad (5.18)$$

$$\text{где } A = \frac{2R}{h+2R}; \quad M = \frac{\rho [2\pi R(a-h)\omega]^2 bR}{2 \cdot \left(1 - \frac{\gamma_{\Pi}}{\gamma_p} \right)^2 (h+2R)^2}; \quad B = \sqrt{\frac{f-1}{f+1}}; \quad f = \frac{1}{A};$$

$$c = (f+1)^2.$$

Сила упругости, затрачиваемая на пенорезину, может быть определена по формуле:

$$P_m = F_1 E \varepsilon, \quad (5.19)$$

где F_1 – площадь сжатия; E – модуль упругости материала; $\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_0}$ – деформация материала; ΔV – уменьшение объема пенорезины после сжатия; V_0 – объем пенорезины до сжатия.

$$V_0 = ab2A''B';$$

$$\Delta V = \frac{bR^2}{2}(\alpha - \sin \alpha),$$

где α – в радианах.

Так как в разных точках контакта вала с пенорезиной деформация различна, то определим значение элементарной силы, действующей на бесконечно малой площадке dF_1 . Для этого продифференцируем:

$$\begin{aligned} \alpha P_m &= E(F_1 d\varepsilon + \varepsilon dF_1); \\ dF_1 &= bR d\alpha; \\ d\varepsilon &= \frac{R^2}{4a A''B'}(d\alpha - \cos \alpha d\alpha). \end{aligned} \quad (5.20)$$

Подставим все значения величин формулы (5.20):

$$dP_m = \frac{EbR^3}{4a A''B'}(d\alpha - \cos \alpha d\alpha + d\alpha - \sin \alpha d\alpha). \quad (5.21)$$

Интегрирование (5.21) в пределах от $-\alpha_k$ до α_k приводит к формуле:

$$P_m = \frac{EbR^3(2\alpha_k - 2\sin \alpha_k + \alpha_k^2 + 2\cos \alpha_k)}{4a \sqrt{(a-h) \left(R - \frac{a-h}{4} \right)}}. \quad (5.22)$$

Формула (5.22) справедлива для случая, когда $h \geq \frac{a}{\Pi}$. При обратном неравенстве начинает деформироваться монолитный слой резины, модуль упругости которой в несколько раз выше, чем у пенорезины. Если такая

деформация имеет место, то усилие на валках можно определить, суммируя усилие на деформацию пенорезины и усилие на деформацию монолита материала пенорезины. Расчетная формула по деформации монолита аналогична (5.22), только вместо a нужно подставить $h_{кр} = a(1 - \Pi)$ и модуль упругости монолита E_p .

Суммарная сила воздействия валка:

$$P_{\Sigma} = P + P_m .$$

Эта величина может быть использована для расчета пружины валков или гидропневмоцилиндров, которые сжимают пенорезину в процессе ее отмывки.

Расчет усилия на валках моечно-отжимной машины, выполненный по предлагаемой методике, показывает, что при скоростях движения пенорезины, применяемых на существующем оборудовании, наибольшее значение имеет усилие от сжатия материала. Влияние гидродинамики потока влаги при этом незначительно. Однако с ростом производительности, а, следовательно, с увеличением угловой скорости валков появляется необходимость учета и гидродинамического фактора при движении изделия между валками.

5.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ВАЛКОВОЙ МАШИНЫ

После промывки изделия из пенорезины имеют очень большую влажность до 250...300%. Поэтому для удаления большей части влаги применяют, как было сказано выше, отжимные устройства в виде валковых машин. В производственных условиях в настоящее время отжим изделия производится двумя-тремя парами валков, расположенных на выходе промывных установок. Однако такой отжим оставляет достаточно большое количество влаги в обработанной пенорезине, до 45...50%. Остаточная влажность изделий является основным критерием оценки эффективности процесса обезвоживания в валковых отжимных устройствах, зависит как от конструктивных параметров (диаметр валков, твердость резинового покрытия), так и от режимов работы (скорость перемещения изделия и линейное давление в жале валков).

Основными узлами экспериментальной установки являются пары обрезиненных валков диаметром 800, 600 и 400 мм и твердостью покрытия 28...68 ед. ШорА. На валках диаметром 800 и 400 мм твердость покрытия – 44 ед. На валках диаметром 600 мм применяются три варианта резинового покрытия: 28, 44 и 66 ед. Линейное давление меняется в диапазоне 10...80 кг/см². Привод вращения валков позволяет изменять скорость перемещения изделия от 1,2 до 2,5 м/мин.

Эффективность отжима оценивалась по остаточной влажности. Исследования проводились на образцах изделий "МАЗ-3016" с габаритными размерами 500×200×60 мм и "ЗИЛ-130 сидения" с размерами 500×200×60 мм.

Для определения влияния диаметра обрезиненного вала на качество отжима была проведена серия экспериментов на валах диаметром 800×600×400 мм с твердостью покрытия 44 ед. ШорА. Скорость перемещения изделий была 1,4 м/мин, линейное давление 50 кг/см². Результаты исследования приведены в табл. 5.1.

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.

В таблице 5.2 приведены данные о влиянии твердости покрытия валков на качество отжима. Опыты проводились на валах диаметром 600 мм с различной твердостью покрытий. Скорость перемещения изделия 1,4 м/мин, линейное давление – 50 кг/см².

Полученные результаты позволили сделать вывод, что лучший эффект создают пары валков 44/68 и 28/68. Исследование зависимости остаточной влажности от скорости движения изделия проводили при линейном давлении 50 кг/см². Скорость движения изделия менялась от 0,26 до 2,5 м/мин.

На рисунке 5.5 представлена графическая зависимость относительной влажности от скорости движения изделий. Видно, что увеличение скорости движения приводит к росту влажности в изделии.

5.1. Влияние диаметра валков на качество отжима

Диаметр валков, мм.	Остаточная влажность, %
400	33,0
600	30,2
800	31

5.2. Влияние твердости покрытия валков на качество отжима

Твердость покрытия валков, ед. ШорА	Остаточная влажность, %
28/28	33
44/44	30
68/68	29
44/68	26
28/68	23

Примечание. В числителе – твердость верхнего вала, в знаменателе – твердость нижнего вала.

Наиболее существенное влияние на эффект отжима оказывает нагрузка на цилиндрическую рабочую поверхность, что отчетливо показано на рис. 5.6. При этом увеличение эффекта отжима находится в пределах давления 10...60 кг/см². Дальнейшее увеличение нагрузки практически не влияет на величину остаточной влажности изделия. Оценить это явление можно гидродинамическим фактором, появлением расклинивающего давления [58] в зазоре валков, повышающего величину этого зазора и проникновение влаги в отжатое изделие.

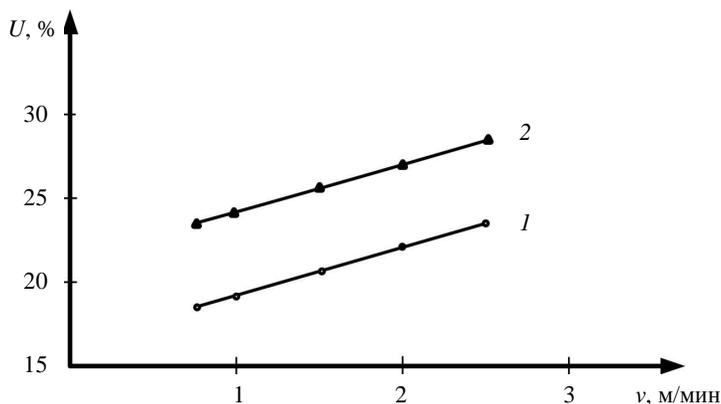


Рис. 5.5. Зависимость влажности изделий из пенорезины от скорости их движения:

1 – "ЗИЛ-130 сидения"; 2 – "ЛИАЗ-3016"

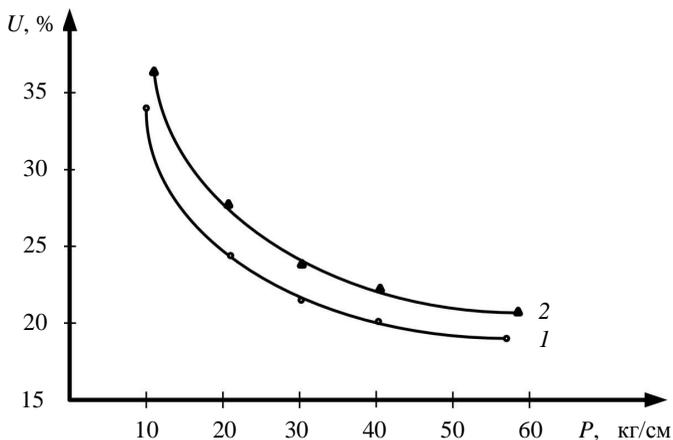


Рис. 5.6. Зависимость влажности изделий из пенорезины от линейного давления между валками:

1 – "ЗИЛ-130 сидения"; 2 – "ЛИАЗ-3016"

5.4. СУШКА ПЕНОРЕЗИНЫ ПОСЛЕ ОТМЫВКИ

После процесса отмывки в валковой машине в пенорезине остается достаточно много влаги. Для сушки изделия применяются камеры с различными условиями процесса нагрева и удаления влаги [59 – 62]. Наиболее распространенными являются: конвективная, радиационно-конвективная, кондуктивная и сушка в электромагнитном поле. Наибольшее применение в настоящее время получила конвективная сушка. Обычно она длится 5–6 ч при температуре в камере 50...60 °С с циркуляцией воздуха. Выбор того или иного способа сушки определяется критериями оптимальности. Это могут быть время сушки, количество затрачиваемой энергии, качество изделия или какой-то другой параметр.

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:

$$\tau = 125 \frac{(G_{уд}^{сух})^{0,8}}{aEV_p^{0,6}} \ln \frac{[a + b(u_2 - u_p)][u_1 - u_p]}{[a + b(u_1 - u_p)][u_2 - u_1]}, \quad (5.23)$$

где $G_{уд}^{сух}$ – удельная "нагрузка" материала на решетку в пересчете на сухой вес, кг/м²; a , b – коэффициенты, не зависящие от влагосодержания и параметров сушильного агента; V_p – массовая скорость фильтрации сушильного агента, кг/м²·с; $E = t_0 - t_m$ – разность температур сухого и мокрого термометров сушильного воздуха; u_p – равновесное влагосодержание.

Кроме конвективной сушки и сушки фильтрацией может быть использован метод с применением токов высокой и сверхвысокой частоты [61, 62]. Применение ТВЧ и СВЧ-энергии обеспечивает равномерный нагрев изделия по всей толщине независимо от конфигурации изделия. При этом процесс сокращается на 10% при малом тепловом воздействии на изделие, благодаря чему улучшается качество – повышается износоустойчивость [61]. Основным недостатком указанного метода является повышенный расход электроэнергии. Так, на удаление 1 кг влаги расходуется около 2 кВт/ч. Количество тепла, образующегося при воздействии переменного электромагнитного поля на диэлектрические материалы, можно определить из выражения [62]

$$Q = kE f \epsilon \operatorname{tg} \delta, \text{ Вт/см}^2, \quad (5.24)$$

где $k = 0,133 \cdot 10^{-12}$ – для ТВЧ; $k = 0,556 \cdot 10^{-12}$ – для СВЧ; f – частота, Гц; E – напряженность поля, В/см; ϵ – диэлектрическая проницаемость; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

К недостаткам применения ТВЧ и СВЧ-энергии 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 [60]. Этот метод эффективнее, когда камера сушки работает под разрежением, создаваемым всасывающим трубопроводом вентилятора.

Проведем сравнительный анализ сушки под разрежением (всасывающий трубопровод) с сушкой на напорном трубопроводе. При этом считаем все величины уравнения (5.23), кроме E , постоянными для обоих случаев сушки.

Тогда время сушки

$$\tau = \frac{A}{E} = \frac{A}{t_0 - t_m}. \quad (5.25)$$

Из [63] разность температур сухого и мокрого термометра

$$t_0 - t_m = \frac{P_{\text{нас}} - P_{\text{п}}}{A_1 \Pi} \quad \text{или} \quad t - t = \frac{K}{\Pi}, \quad (5.26)$$

где $K = \frac{P_{\text{нас}} - P_{\text{п}}}{A_1}$; $P_{\text{нас}}$ – давление насыщенного пара при температуре мокрого термометра; $P_{\text{п}}$ – парциальное давление водяного пара; Π – барометрическое давление.

Для случая сушки потоком воздуха во всасывающем трубопроводе $\Pi_1 = P_1$, а для сушки потоком воздуха в нагнетательном трубопроводе $\Pi_2 = P_2$, тогда из уравнений (5.25) и (5.26):

$$\tau_1 = \frac{A \Pi_1}{K} = \frac{A P_1}{K}; \quad \tau_2 = \frac{A \Pi_2}{K} = \frac{A P_2}{K}; \quad (5.27)$$

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{P_1}{P_2}; \quad \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{P_1}{\varepsilon}, \quad (5.28)$$

где $\varepsilon = \frac{P_2}{P_1}$ – степень сжатия воздуходувной машины.

Время сушки во всасывающем трубопроводе из (5.28)

$$\tau = \frac{\tau_2}{\varepsilon}. \quad (5.29)$$

Степень сжатия для вентиляторов $\varepsilon_1 \leq 1,05$.

Степень сжатия воздуходувок $\varepsilon_1 \leq 2,0$.

Из (5.29) следует, что применение вентилятора по сравнению с традиционным способом сушки уменьшает время сушки на 5%, а в случае применения воздуходувки может достигать 50%. Однако применение воздуходувки резко повышает затраты энергии на сушку, поэтому более целесообразно применение вентиляторов высокого давления с сушкой во всасывающем трубопроводе.

6. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОРЕЗИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВСПЕНИВАТЕЛЯ ЛАБИРИНТНОГО ТИПА

6.1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ПЕНОРЕЗИНЫ

Исходя из структурной схемы производства пенорезины (рис. 1.1), необходимо установить функциональную зависимость между выходными и входными параметрами процесса. Основной операцией в производстве пенорезины является получение пены во вспенивателе. Как известно, физико-механические свойства пенорезины зависят от структуры, т.е. размера и форм ячеек, которые в свою очередь зависят от поведения латексной пены при вспенивании, желатинировании и вулканизации. Ввиду термодинамической неустойчивости, в пене происходят качественные изменения, связанные с образованием структуры с сообщающимися порами. Характер изменения зависит от физико-химических свойств латекса, кратности пены и других параметров.

Связь между кратностью пены и размерами пор при определенном режиме работы вспенивателя, как показано выше, можно описать уравнением

$$r = 1,045 \sqrt[3]{\frac{3Q_{\text{л}}(K-1)\mu(\pi d_{\text{ср}} + 2t - tz)}{z d_{\text{ср}} n a \rho (1 + 0,5bt) \left(\pi d_{\text{ср}} t - \frac{zt^2}{2} \sqrt{3} \right)}}. \quad (6.1)$$

На основании работы [64], устанавливающей связь основных физико-механических свойств пенорезины с исследованными параметрами, можно использовать следующие уравнения.

Твердость пенорезины

$$H = 4,18\gamma + 0,0148h - 0,467, \quad (6.2)$$

где γ – кажущаяся плотность пенорезины, кг/м^3 ; H – твердость пенорезины, кг/м^2 ; h – жидкость резиновой пленки при изгибе, Н.

Сопrotивление разрыву пенорезины

$$\sigma_{\text{п}} = 0,295\gamma + 0,0023\sigma_{\text{н}} + 18K - 0,548, \quad (6.3)$$

где $\sigma_{\text{п}}$ – сопротивление разрыву резиновой пленки, Н/м^2 ; $K_1 = 0,02 \dots 0,06$ – коэффициент структуры, численно равный отношению прочности пеноре-

зины, рассчитанной на сечение, занимаемое резиной, к прочности монолитной резиновой пленки.

Относительное удлинение пенорезины в %

$$\varepsilon = 0,451\varepsilon_{\Pi} + 1700K_1 + 197,$$

где ε_{Π} – относительное удлинение резиновой пленки, %.

Свяжем основные параметры пены с величинами уравнения (6.2).

Кажущаяся плотность

$$\gamma = \frac{G_{\kappa}}{V_{\Pi}}, \quad (6.4)$$

где G_{κ} – масса каучука в пене, кг; V_{Π} – объем пены, м³.

Масса каучука в пене:

$$G_{\kappa} = \gamma_{\kappa} f_{\text{M}} \delta, \quad (6.5)$$

где γ_{κ} – плотность каучука, кг/м³; f_{M} – межфазная поверхность, м²; δ – толщина пленки ячеек, м.

Объем пены в свою очередь

$$V_{\Pi} = KV_{\text{Л}}, \quad (6.6)$$

где K – кратность пены; $V_{\text{Л}}$ – объем латекса, мм³.

Подставим (6.6) в (6.4). Тогда

$$\gamma = \frac{\gamma_{\kappa} f_{\text{M}} \delta}{KV_{\text{Л}}}. \quad (6.7)$$

Межфазная поверхность [65]

$$f_{\text{M}} = \frac{\sigma \varphi V_{\Pi}}{d} \left(\frac{\sigma^2 + d^2}{3\sigma^2 + d^2} \right), \quad (6.8)$$

где φ – газосодержание пены; d – средний диаметр газового пузыря, м; σ – среднеквадратичное отклонение (стандарт кривой распределения).

Газосодержание

$$\varphi = 1 - \frac{1}{\bar{H}}, \quad \bar{H} = \frac{H_{\text{с}}}{L}, \quad (6.9)$$

где \bar{H} – приведенная высота пены; $H_{\text{с}}$ – высота слоя пены, м; $h_{\text{с}}$ – высота исходного слоя жидкости, м.

Так как $V_{\text{п}} = H_c F$ и $V_{\text{л}} = h_c F$, то кратность пены

$$K = H. \quad (6.10)$$

Тогда

$$\varphi = 1 - \frac{1}{K} = \frac{K-1}{K}. \quad (6.11)$$

Подставим полученные значения $f_{\text{м}}$, γ в (6.1).

Тогда твердость пенорезины можно выразить уравнением:

$$H = \frac{25\gamma_{\text{к}}(K-1)\delta}{K^2 d V_{\text{л}}} \left(\frac{\sigma^2 + d^2}{3\sigma^2 + d^2} \right) + 1,48 \cdot 10^{-2} h - 0,467. \quad (6.12)$$

Средний диаметр пузырька связан с толщиной пленки [66]:

$$\delta = \frac{d}{3(K-1)}. \quad (6.13)$$

Подставим значение δ в уравнение (6.12) и получим зависимость твердости пенорезины от величины среднего диаметра пузырька:

$$H = \frac{25\gamma_{\text{к}}}{3K^2 V_{\text{л}}} \left(\frac{\sigma^2 + d^2}{3\sigma^2 + d^2} \right) + 1,48 \cdot 10^{-2} h - 0,467. \quad (6.14)$$

Распределение температур в желатинизирующей пене можно описать уравнением теплопроводности, полученным в п. 4.1.

Процесс отмывки пенорезины от некаучуковых, связанный с режимом работы валковой отжимной машины, описывается уравнением для расчета усилия на валках:

$$P = P_1 + P_2,$$

где P_1 – усилие от гидродинамического фактора, Н; P_2 – усилие на сжатие пенорезины, Н.

$$P_1 = M \left\{ \frac{K'}{CB^2} \left[\frac{(1-B)\text{tg} \frac{\alpha_k}{2}}{\left(\text{tg} \frac{\alpha_k}{2} \right)^2 + B^2} + \frac{(1+B)^2}{B} \arctg \frac{\text{tg} \frac{\alpha_k}{2}}{B} \right] + \frac{c'}{A} \left(\frac{1}{1-A} - \frac{1}{1-\cos \alpha_k} \right) \right\}; \quad (6.15)$$

$$A = \frac{2R}{h + 2R}; \quad M = \frac{\rho [2\pi R(a-h)\omega]^2 bR}{2 \left(1 - \frac{\gamma_n}{\gamma_p}\right) (h + 2R^2)};$$

$$B = \sqrt{\frac{f-1}{f+1}}; \quad f = \frac{1}{A}; \quad c = (f+1)^2;$$

$$P_2 = \frac{EbR^3 \left(2\alpha_k - 2\sin \alpha_k + \alpha_k^2 + 2\cos \alpha_k\right)}{4a \sqrt{(a-h) \left(R - \frac{a-h}{4}\right)}}. \quad (6.16)$$

Процесс сушки пенорезины после ее промывки описывается сопряженными уравнениями теплообмена, как показано в п. 4.1.

Эти перечисленные математические зависимости устанавливают связь между входными и выходными параметрами на каждом этапе технологического процесса изготовления пенорезины. Таким образом, имеем математическое описание всего процесса, которое позволяет рассчитать значения требуемых параметров в зависимости от условий технологии и физико-механических свойств латексной пены.

6.2. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВСПЕНИВАТЕЛЯ ЛАБИРИНТНОГО ТИПА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕНОРЕЗИНЫ

Экономическую целесообразность применения вспенивателя лабиринтного типа можно оценить путем сравнения затрат потребляемой мощности при работе с латексным насосом и в случае замены насоса на вспениватель.

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

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

где K – коэффициент запаса; η – КПД вспенивателя.

Затраты мощности на единицу продукции существующего оборудования:

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

Затраты при работе лабиринтного вспенивателя

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

Экономическая эффективность

$$S_2 = \frac{S_1}{S_2} = \frac{0,0105}{0,00215} = 4,88 .$$

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

6.3. МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОРЕЗИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВСПЕНИВАТЕЛЯ ЛАБИРИНТНОГО ТИПА

Процесс приготовления пенорезины, как уже указывалось, представлен структурной схемой на рис. 1.1. Исходными материалами являются латексы определенных физико-химических свойств и различного рода добавки. Основными показателями качества пены являются ее монодисперсность и размер пузырьков. Таким образом, исходными данными конкретной пенорезины являются: вязкость, плотность, размер пузырьков, кратность пены, производительность. На основе этих данных и проведенных теоретических и экспериментальных исследований из формулы (2.23) можно рассчитать основные параметры конструкции и режим работы вспенивателя лабиринтного типа. Выходным параметром является кратность пены.

Расчет агрегата вулканизации–желатинирования, а также условий его функционирования производится по формулам (4.1) и (4.2) сопряженного теплообмена, а также по формуле (4.66) при вулканизации [66 – 70].

После агрегата АЖВ пенорезина подвергается отмывке от некаучуковых примесей. Расчет конструкции и режимных параметров валковой машины производится на основе формул (5.11) и (5.22).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена новая конструкция вспенивателя латексной смеси в производстве пенорезины, которая позволяет осуществлять не только получение пены, но и ее 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 получена 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 приближаются 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, которые подтверждаются экспериментальными данными.

12. Решена в аналитической форме задача теплопроводности латексной пенорезины при вулканизации.

13. Показана экономическая целесообразность применения вспенивателя лабиринтного типа в технологической схеме изготовления пенорезины.

14. Разработанный вспениватель лабиринтного типа и методики расчета основных параметров вспенивателя, агрегата желатинирования–вулканизации, машины по отмывке пенорезины приняты ОАО "НИИР-ТМаш" (г. Тамбов) для промышленного проектирования линии по производству пенорезины. Расчетный экономический эффект от результатов работы составляет 245 тысяч рублей в год.

15. Результаты проведенных исследований и созданная на их основе инженерная методика и программное обеспечение использованы в учебном процессе ФГБОУ ВПО "Тамбовский государственный технический университет" 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"; в Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина; Военном авиационном инженерном университете (г. Воронеж) по дисциплине "Радиационная, химическая и биологическая защита".

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных условиях требуются ускоренная разработка и внедрение в производство новых поколений высокоэффективной техники, выпуск прогрессивного тепло- и массообменного оборудования на основе новых технологических процессов. Поэтому получение пенорезины из латекса с использованием высокоэффективного оборудования – вспенивателя, является актуальной научной и производственной задачей.

В монографии исследованы и решены вопросы процесса изготовления латексной пенорезины и его аппаратурного оформления, включающего новую технологическую операцию – вспенивание латекса в устройстве лабиринтного типа.

В работе предложен новый тип вспенивателя лабиринтного типа, позволяющий наиболее эффективно создавать пену и одновременно осуществлять ее транспортирование на следующую операцию. Проведены экспериментальные исследования на вспенивателе при различных значениях технологических параметров. Разработана теория пенообразования в лабиринтном вспенивателе, на основе которой можно производить его расчет и конструирование для заданных условий производства.

Разработана инженерная методика для расчета режимных переменных и конструктивных параметров оборудования для производства пенорезины.

Представленная работа может быть рекомендована к использованию производственными и проектными организациями при модернизации и разработке смесителей, а также в учебном процессе при подготовке бакалавров, специалистов и магистров, изучающих процессы и оборудование переработки полимерных материалов.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- ΔV – объем пузырьков, Н/м²;
 $V_{п}$ – объем пены, м³;
 $V_{л}$ – объем латекса, м³;
 $\gamma_{л}$ – удельная масса латекса, кг/м³;
 $\rho_{л}$ – плотность латекса, кг/м³;
 $g_{п}$ – масса пены, кг;
 μ – вязкость жидкости, Па·с;
 r – радиус пузырька, м;
 z – число заходов ротора;
 v – окружная скорость ротора, м/с;
 F – проходное сечение вспенивателя, м²;
 Π – периметр проходного сечения, м;
 α – угол нарезки ротора и статора;
 Q – расход жидкости, м³/с;
 s – шаг нарезки, м;
 ϑ – скорость течения влаги через поры, м/с.

Индексы

- н – начальное;
к – конечное;
 Σ – суммарная;
л – латекс;
п – пена;
в – воздух;
пр – приведенный.

Аббревиатуры

ТГТУ – Тамбовский государственный технический университет;
АЖВ – агрегат желатинирования–вулканизации; ПАВ – поверхностно-активные вещества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелик Е.А. и др. Изучение свойств латексных пен // Проблема синтеза, исследования свойств и переработки латексов. – М.: ЦНИИТЭ-НЕФТЕХИМ, 1971. – С. 123.
2. Брит. патент № 332525, № 332526, 1930.
3. Murphy E.A. Trans. Inst. Ruff. Ind, 1955.
4. Брит. патент № 471899, 1937.
5. Нобель Р.Дж. Латекс в технике. – Л.: Госхимиздат, 1962. – С. 620 – 633.
6. Rubb. Development, 19, № 2, 68. 1966.
7. Брит. патент № 455138, 1936.
8. Брит. патент № 619619, 1949.
9. Брит. патент № 101250, 1965.
10. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их применения, получения и разрешения. – М.: Химия, 1975. – 264 с.
11. Chang R., Schoen H., Grove C. Ind. Eng. Chem., 1956, 48, № 11, p. 2035–2039.
12. Сандомирский Д.М., Короткова А.А. Исследование латексных пен // Коллоид. журнал. – 1961. – Т. 23, № 1. – С. 95 – 99.
13. Вейлер С.Я., Ребиндер П.А. Докл. АН СССР, 49, 354, 1945.
14. Brady A., Ross S.J. Am. Chem. Soc., 1944, 66, № 8. – P. 1348 – 1356.
15. Bikerman J. Surface chemistry. – New-York, 1958. – 501 p.
16. Кругляков П.М., Таубе П.Р. Изменение удельной поверхности пены // Журн. прикл. химии. – 1965. – Т. 38, № 10. – С. 2258 – 2264.
17. Кругляков П.М., Таубе П.Р. Некоторые вопросы кинетики разрушения пен // Журн. прикл. химии. – 1969. – Т. 38, № 7. – С. 1514 – 1520.
18. Haas P., Johnston H. Ind. Eng. Chem. Fundam., 1967, 6, № 2. – P. 225 – 233.
19. De Vries A. Rec. trav. chem, 1958, 71, № 4. – P. 283 – 296.
20. Павлов, В.А. Пенополистирол. – М.: Химия, 1973. – 240 с.
21. Голубев А.И. Лабиринтные насосы для химической промышленности. – М., 1961. – 75 с.
22. Кульбашный А.С., Клинков А.С. Разработка конструкции вспенивателя латексной смеси и методика его расчета // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 643 – 648.
23. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятности и математической статистики. – М.: Наука, 1969. – 512 с.

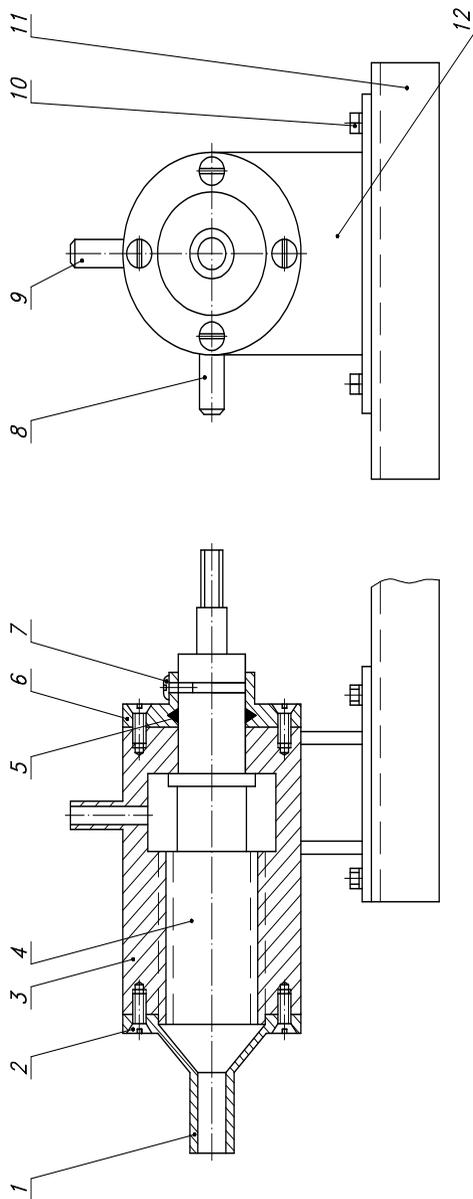
24. Горелик Е.А. и др. Получение пенорезины методом химического вспенивания латексной смеси // Каучук и резина. – 1978. – № 7. – С. 18.
25. Горелик Е.А. и др. Способы изготовления губчатых изделий из латекса. – М.: ЦНИТЭНЕФТЕХИМ, 1974. – С. 50.
26. Колосова Н.Д. и др. Влияние некоторых рецептурных факторов на себестоимость губчатых изделий из латекса // Каучук и резина. – 1975. – № 9. – С. 21.
27. Короткова А.А. Исследование процесса изготовления губчатой резины из синтетических латексов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1953. – 21 с.
28. Короткова А.А. Свойства пен из натурального латекса // Каучук и резина. – 1962. – № 10. – С. 47.
29. Родина З.К. и др. Исследование температурных полей желатинирования-вулканизации латексной пены при получении пенорезины // Производство шин, РТИ и АТИ. – 1973. – № 9. – С. 43.
30. Савинкова А.И. и др. Исследование влияния различных факторов, нежелатинированных латексов // Каучук и резина. – 1968. – № 1. – С. 28.
31. Силонова М.С. Исследование факторов, определяющих свойства пенорезины: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1971. – 18 с.
32. Терейковский В.Н. и др. Метод непрерывности контроля кратности латексной пены при производстве пенорезины // Каучук и резина. – 1975. – № 6. – С. 53.
33. Трофимович Д.П. Разработка научных основ и обоснование параметров технологического процесса производства изделия из пенорезины: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1981. – 32 с.
34. Трофимович Д.П., Силонова М.С. Производство губчатых изделий из латекса. – М.: ЦНИИТЭнерготехим, 1967. – Вып. 3. – 35 с.
35. Амелина Н.В., Соколов М.В. Движение латексных нитей в ваннах промывки // Труды ТГТУ. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – Вып. 13. – С. 56 – 59.
36. Амелина Н.В., Астафьев В.И. Вытяжка и промывка латексных нитей. Термообработка латексных нитей // V науч. конф. ТГТУ. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. – С. 47–48.
37. Амелина Н.В. и др. Описание формирования резиновых нитей из латекса // Вестник Тамбовского государственного технического университета, 2003. – Т. 9, № 2. – С. 236 – 240.
38. Амелина Н.В. и др. К вопросу синтетезиса латексных гелей // Вестник Тамбовского государственного технического университета, 2003. – Т. 9, № 4. – С. 669 – 673.
39. Лыков А.В. Теплообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

40. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технических процессах. – М.: Химия, 1993. – 208 с.
41. Напарьин Ю.А. и др. Теплофизические свойства резин и полиуретанов // Каучук и резина. – 1981. – № 2. – С. 29.
42. Рудобашта С.П. и др. Кинетические закономерности процесса сушки латексных пленок // Каучук и резина. – 1977. – № 1. – С. 11.
43. Смирнов М.М. Дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка. – М.: Наука, 1964. – 523 с.
44. Малкина Х.Э. и др. Период сушки-вулканизации изделий из латекса // Каучук и резина. – 1958. – № 7. – С. 21.
45. Гофманн В. Вулканизация и вулканизирующие агенты. – Л.: Химия, 1968. – 462 с.
46. Жарова Т.Э. Непрерывная вулканизация шприцованных изделий за рубежом // Производство шин, РТИ и АТИ. – 1969. – № 4. – С. 8.
47. Захаров Н.Д. Теоретические основы вулканизации хлоропреновых каучуков // Современные достижения в области физико-химии латексов. – М.: НИИР, 1971. – С. 111.
48. Ларина Л.Н. и др. Исследования вулканизации латексных пленок тиурамной системы при производстве изделий медицинского назначения // Проблемы технологии переработки латексов и их применения. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1978. – С. 91.
49. Липкин А.М. и др. О вулканизации латексных пленок на основе тройного этилен-пропиленового сополимера // Каучук и резина. – 1972. – № 9. – С. 17.
50. Спектор Э.М. и др. Исследование серной вулканизации латексов СКС-65 // Коллоид. журнал. – 1972. – Т. 34, вып. 6. – С. 508.
51. Ходжаева И.Д. и др. О структуре пленок, полученных из водных дисперсий изопреновых каучуков // Коллоид. журнал. – 1976. – Т. 38, вып. 2. – С. 403.
52. Ходжаева И.Д. и др. Влияние ПАВ на процесс вулканизации пленок из водных дисперсий изопреновых каучуков и резиновых смесей на их основе // Каучук и резина. – 1975. – № 6. – С. 16.
53. Черная В.В., Мазина Г.Р. Некоторые особенности вулканизации пленок из хлорированного латекса // Каучук и резина. – 1975. – № 6. – С. 16.
54. Несмеянов М.В. и др. Теплообмен в процессе желатинирования-вулканизации латексной пены // Каучук и резина. – 1984. – № 6. – С. 21.
55. www.polymermash.ru "ЗАО "Полимермаш". Оборудование для изготовления пенорезины. Санкт-Петербург.
56. Лыков А.В. Теплообмен: Справочник. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

57. Башта Т.М. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы. – М.: Машиностроение, 1970. – 504 с.
58. Повх И.Л. Технологическая гидромеханика. – Л.: Машиностроение, 1968. – 524 с.
59. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 471 с.
60. Кучерявый М.А., Пикус И.Ф. Исследование гидравлического сопротивления губчатой резины при сушке методом сквозной фильтрации газа // Каучук и резина. – 1972. – № 10. – С. 29.
61. Тюрин Н.А. и др. Сушка латексной губки в поле СВЧ-энергии // Каучук и резина. – 1976. – № 7. – С. 23.
62. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот. – М.: Энергия, 1968. – 386 с.
63. Павлов К.Ф. и др. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1976. – 552 с.
64. Силонова М.С. О количественной связи между жесткостью латексных пленок, параметрами макроструктуры пенорезины и ее твердостью // Каучук и резина. – 1972. – № 2. – С. 21 – 23.
65. Верхоланцев В.В. К методике оценки структурных превращений при формировании латексных пленок // Лакокрасочные материалы и их применения. – М., 1971. – № 1. – С. 27–28. – URL: www.laki-kraski.info (интернет-версия).
66. Кульбашный А.С., Клинков А.С. Разработка конструкции вспенивателя латексной смеси и методика его расчета // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 643 – 648.
67. Амелина Н.В., Кульбашный А.С., Клинков А.С., Однолько В.Г. Интенсификация сушки латексных гелей // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2010. – № 7 – 9 (30). – С. 325 – 328.
68. Амелина Н.В., Кульбашный А.С., Клинков А.С., Полушкин Д.Л. Применение метода ПФЭ для анализа работы линии технических напалечников // Труды ТГТУ: Сборник научных статей. – Тамбов, 2010. – Вып. 23. – С. 167 – 169.
69. Амелина Н.В., Кульбашный А.С., Клинков А.С., Однолько В.Г. Режимы движения формы при изготовлении маканых изделий из латекса // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2010. – № 10 – 12 (31). – С. 355.
70. Амелина Н.В., Кульбашный А.С., Клинков А.С., Беляев П.С. Определение расхода коагулянта при гелеобразовании // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2010. – № 7 – 9 (30). – С. 322.

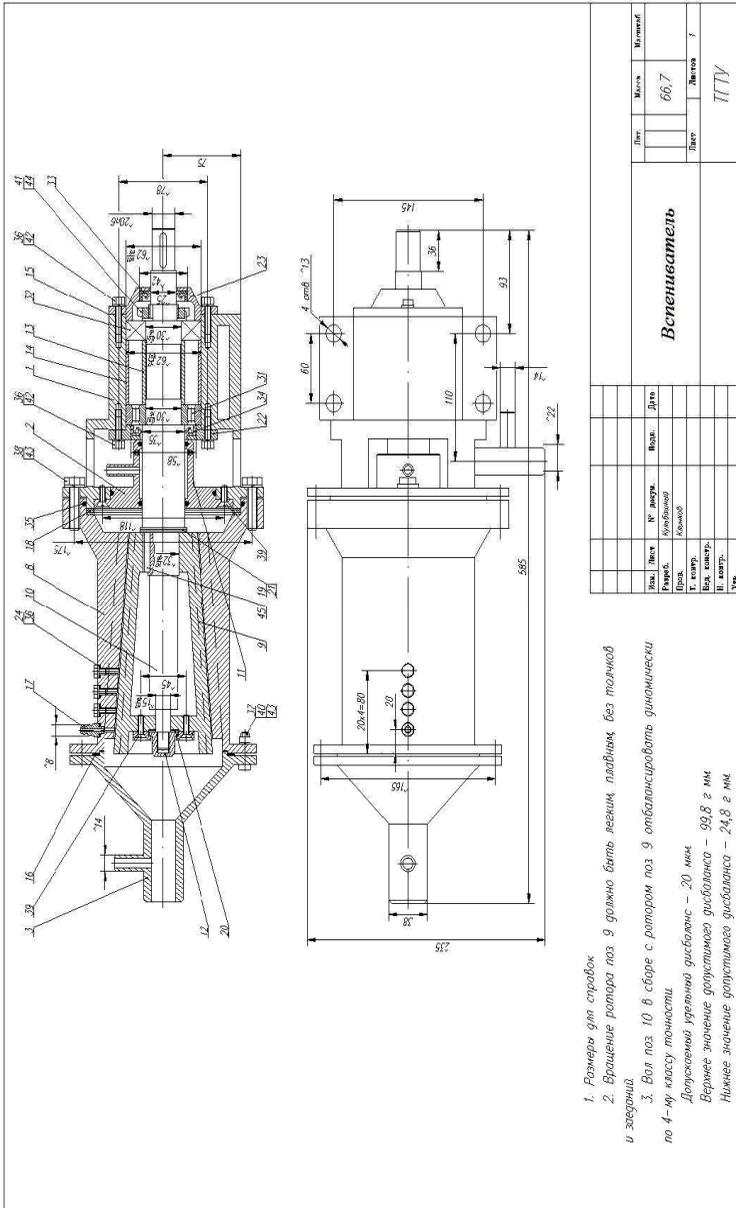
ПРИЛОЖЕНИЯ

1. ЧЕРТЕЖ ВСПЕНИВАТЕЛЯ ЛАБИРИНТНОГО ТИПА



N поз.	Наименование	Кол-во	N поз.	Наименование	Кол-во
1	Крышка	1	7	Винт стопорный М5х10	1
2	Винт М6х10	8	8	Штуцер водяной	1
3	Втулка М40х3 (правая)	1	9	Штуцер воздушный	1
4	Винт М40х3 (левая)	1	10	Болт М8х30	4
5	Сальник	1	11	Рама L25х25х3	1
6	Крышка с сальником	1	12	Опора	1

2. ЧЕРТЕЖ ПРОМЫШЛЕННОГО ВСПЕНИВАТЕЛЯ ЛАБИРИНТНОГО ТИПА



3. ПРОГРАММА РАСЧЕТА НА ЭВМ ДВУМЕРНОЙ ЗАДАЧИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

```
// Брус.cpp : Defines the entry point for the console application.
//

#include "stdafx.h"
#include <iostream>
#include <conio.h>

#define n1 72

FILE *fo;
char fw[12];

int n=n1-1,i,j;
double tc=160.0, t0=20.0;
double la=0.28, c=1660.0, ro=1130.0, l=0.6, b=0.04;
double a, s, t, tay, t1, t2, ts, rog, lag, mug, w;
double
mu[n1],nu[n1],fm[n1],fn[n1],mz[n1],nz[n1],cm[n1],cn[n1],al[5];

double sign(double x)
{ double u;
  if (x==0) u=0; else u=x/fabs(x);
  return(u);}

double fmu(double s)
{ double u,fi=atan(la*s/al[1]);
  u=la*s*cos(s*1+fi)+al[2]*sin(s*1+fi);
  return(u);}

double fnu(double s)
{ double u,fi=atan(la*s/al[3]);
  u=la*s*cos(s*b+fi)+al[4]*sin(s*b+fi);
  return(u);}

void h0(double (*z)(double s), double h[])
```

```

{ double k,y,q,dm,f; int i; s=1.0e-6;
f=z(s); k=sign(f); for (i=1; i<=n; i++)
{ y=1.0; q=i; if (i==1) dm=0.005; else dm=0.15*s/q;
  while (fabs(dm)>1.0e-10)
{ s+=dm; f=k*z(s); if (f<0) y=0.5; if (f==0) dm=0; else
  dm=y*fabs(dm*f)/f;} h[i]=s; k*=-1;} }

void vsp()
{ strcpy(fw,"temp.dat"); fo=fopen(fw,"w");
rog=1.293*273.0/(273.0+tc);
lag=0.0256+2.318e-5*tc;
mug=17.3e-6*397.0*pow(tc/273.0+1.0,1.5)/(tc+397.0);
w=10.0; a=la/(c*ro);
al[1]=al[2]=al[3]=al[4]=0.032*lag*pow(w*1*rog/mug,0.8)/l;
h0(fmu,mu); h0(fnu,nu);
for (i=1; i<=n; i++) {
fm[i]=atan(la*mu[i]/al[1]);
fn[i]=atan(la*nu[i]/al[3]);
nz[i]=0.5*(nu[i]*b+sin(fn[i])*cos(fn[i])-
sin(nu[i]*b+fn[i])*cos(nu[i]*b+fn[i]))/nu[i];
mz[i]=0.5*(mu[i]*l+sin(fm[i])*cos(fm[i])-
sin(mu[i]*l+fm[i])*cos(mu[i]*l+fm[i]))/mu[i];
cm[i]=(cos(mu[i]*l+fm[i])-cos(fm[i]))/mu[i];
cn[i]=(cos(nu[i]*b+fn[i])-cos(fn[i]))/nu[i]; }

void main() { vsp();
for (tay=0; tay<=6000; tay+=100)
{ t1=tc; t2=tc; ts=tc;
for (i=1; i<=n; i++) for (j=1; j<=n; j++)
{ t1+=((t0-tc)*sin(mu[i]*1*0.5+fm[i])*sin(nu[j]*b+fn[j]))*cm[i]*cn[j]*
exp(-a*(mu[i]*mu[i]+nu[j]*nu[j])*tay)/(mz[i]*nz[j]);
t2+=((t0-tc)*sin(mu[i]*1*0.5+fm[i])*sin(nu[j]*b*0.5+fn[j]))*cm[i]*cn[j]*
exp(-a*(mu[i]*mu[i]+nu[j]*nu[j])*tay)/(mz[i]*nz[j]);
ts+=((t0-tc)*cm[i]*cn[j]*cm[i]*cn[j])*exp(-
a*(mu[i]*mu[i]+nu[j]*nu[j])*tay)/(mz[i]*nz[j]*1*b); }
fprintf(fo,"\n %6.1f %5.1f %5.1f %5.1f ", tay,t1,t2,ts);
printf("\n %6.1f %5.1f %5.1f %5.1f ", tay,t1,t2,ts); getch(); }
fclose(fo);}

```

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ВСПЕНЕННОЙ ЗАГОТОВКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ

Исходные данные

Начальная температура заготовки, °С	100
Температура горячего воздуха, °С	160
Ширина заготовки, м	0,6
Толщина заготовки, м	0,04
Теплоемкость резины, Дж/(кг·°С)	1250
Плотность резины, кг/м ³	60
Теплопроводность резины, Вт/(м·°С)	0,038

Результаты расчета

τ	t_p	t_c	t_s	τ	t_p	t_c	t_s
0,0	105,3	100,5	100,1	1740,0	159,9	159,3	159,6
60,0	151,6	100,8	115,8	1800,0	159,9	159,4	159,7
120,0	154,0	106,5	123,5	1860,0	160,0	159,5	159,7
180,0	155,1	113,8	129,4	1920,0	160,0	159,6	159,8
240,0	155,9	120,6	134,2	1980,0	160,0	159,7	159,8
300,0	156,6	126,5	138,2	2040,0	160,0	159,7	159,8
360,0	157,1	131,5	141,6	2100,0	160,0	159,8	159,9
420,0	157,5	135,8	144,5	2160,0	160,0	159,8	159,9
480,0	157,9	139,5	146,9	2220,0	160,0	159,8	159,9
540,0	158,2	142,6	148,9	2280,0	160,0	159,8	159,9
600,0	158,5	145,2	150,6	2340,0	160,0	159,9	159,9
660,0	158,7	147,5	152,0	2400,0	160,0	159,9	159,9
720,0	158,9	149,4	153,3	2460,0	160,0	159,9	159,9
780,0	159,1	151,0	154,3	2520,0	160,0	159,9	160,0
840,0	159,2	152,3	155,2	2580,0	160,0	159,9	160,0
900,0	159,3	153,5	155,9	2640,0	160,0	159,9	160,0
960,0	159,4	154,5	156,5	2700,0	160,0	160,0	160,0
1020,0	159,5	155,3	157,1	2760,0	160,0	160,0	160,0
1080,0	159,6	156,0	157,5	2820,0	160,0	160,0	160,0
1140,0	159,7	156,6	157,9	2880,0	160,0	160,0	160,0
1200,0	159,7	157,1	158,2	2940,0	160,0	160,0	160,0
1260,0	159,8	157,6	158,5	3000,0	160,0	160,0	160,0
1320,0	159,8	157,9	158,7				
1380,0	159,8	158,2	158,9				
1440,0	159,8	158,5	159,1				
1550,0	159,9	158,7	159,2				
1560,0	159,9	158,9	159,3				
1620,0	159,9	159,1	159,4				
1680,0	159,9	159,2	159,5				

τ – время, с

t_p – температура поверхности, °С

t_c – температура в центре, °С

t_s – средняя температура, °С

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ПЕНОРЕЗИНЫ	6
1.1. Исходные материалы	6
1.2. Технологический процесс изготовления пенорезины	7
1.3. Способы получения и свойства пенорезины	9
1.3.1. Плотность и дисперсность пенорезины	11
1.3.2. Процессы разрушения пенорезины	13
1.3.3. Разрушение пленок пены	18
1.4. Методы исследования пенорезины	19
2. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛАТЕКСНОЙ ПЕНОРЕЗИНЫ	21
2.1. Вспениватели, используемые в производстве пенорезины	21
2.2. Вспениватель лабиринтного типа	24
2.3. Пенообразование в устройстве лабиринтного типа	26
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕНООБРАЗОВАНИЯ ВО ВСПЕНИВАТЕЛЕ ЛАБИРИНТНОГО ТИПА	31
3.1. Разработка экспериментальной установки вспенивателя лабиринтного типа	31
3.2. Программа и методика проведения экспериментов во вспенивателе лабиринтного типа	33
3.3. Течение жидкости во вспенивателе лабиринтного типа	34
3.4. Рабочие характеристики вспенивателя	37
3.5. Результаты экспериментальных исследований по отработке режимов работы вспенивателя	41
3.6. Методика расчета вспенивателя лабиринтного типа	47
3.7. Основные результаты исследования лабиринтного вспенивателя	48

4. ФОРМИРОВАНИЕ ПЕНОРЕЗИНЫ В АГРЕГАТЕ ЖЕЛАТИНИРОВАНИЯ И ВУЛКАНИЗАЦИИ	49
4.1. Желатинирование пены	49
4.2. Вулканизация пенорезины	53
5. ОТМЫВКА ПЕНОРЕЗИНЫ ОТ ПРИМЕСЕЙ	62
5.1. Устройства для отмывки пенорезины	62
5.2. Процесс отжима пенорезины в валковой машине	63
5.3. Экспериментальные исследования работы валковой машины	72
5.4. Сушка пенорезины после отмывки.....	75
6. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОРЕЗИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВСПЕНИВАТЕЛЯ ЛАБИРИНТНОГО ТИПА	77
6.1. Математическое описание производства пенорезины	77
6.2. Экономическое обоснование использования вспенивателя лабиринтного типа при производстве пенорезины	80
6.3. Методика инженерного расчета получения пенорезины с использованием вспенивателя лабиринтного типа	81
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	84
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	85
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	86
ПРИЛОЖЕНИЯ	90

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**КЛИНКОВ Алексей Степанович,
КУЛЬБАШНЫЙ Антон Сергеевич,
СОКОЛОВ Михаил Владимирович,
ОДНОЛЬКО Валерий Григорьевич**

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА И
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
ЛАТЕКСНОЙ ПЕНОРЕЗИНЫ**

Редактор *Т.М. Глинкина*

Инженер по компьютерному макетированию *Т.Ю. Зотова*

Сдано в набор 07.09.2012.

Подписано в печать 17.10.2012.

Формат 60 × 84/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.

Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,58. Уч.-изд. л. 5,4.

Тираж 400 экз. Заказ № 522

ООО "Издательский дом "Спектр",
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1
[Http://www.idspektr.ru](http://www.idspektr.ru). E-mail: idspektr@rambler.ru

Подготовлено к печати и отпечатано
в Издательско-полиграфическом центре
ФГБОУ ВПО "ТГТУ"

392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14

ISBN 978-5-4442-0014-8



По вопросам приобретения книги обращаться по телефону 8(4752)638108
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru

