

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический университет»

**Н. В. Амелина, П. С. Беляев,  
А. С. Клинков, М. В. Соколов**

**КИНЕТИКА И АППАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ  
ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
РЕЗИНОВЫХ НИТЕЙ ИЗ ЛАТЕКСА**

*Рекомендовано Научно-техническим советом университета  
в качестве монографии*



---

---

Тамбов  
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
2015

УДК 621.43.036.9  
ББК Л728.1  
К24

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Энергообеспечение предприятий и теплотехника» ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
*Н. П. Жуков*

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
заместитель директора ОАО «НИИРТмаш»  
*В. Н. Шашков*

К24 **Кинетика** и аппаратурно-технологическое оформление процесса изготовления резиновых нитей из латекса / Н. В. Амелина, П. С. Беляев, А. С. Клинков, М. В. Соколов : монография. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 80 с. – 500 экз. – ISBN 978-5-8265-1405-4.

Рассмотрены основные технологические и конструктивные аспекты разработки аппаратурно-технологического оформления процесса изготовления резиновых нитей из латекса. Особое внимание уделено вопросам моделирования кинетики процесса получения нитей из латекса. Приведена методика расчета элементов линии для производства лент из нитей.

Монография полезна для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и эксплуатацией оборудования по переработке латексов, а также аспирантам, магистрантам и студентам старших курсов, специализирующимся в области переработки пластмасс и эластомеров.

УДК 621.43.036.9  
ББК Л728.1

ISBN 978-5-8265-1405-4

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2015

## ВВЕДЕНИЕ

---

Улучшение экономического и социального положения страны может быть достигнуто, если главной задачей становится повышение темпов 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, переводу экономики на рельсы всесторонней интенсификации. Эти задачи касаются и производства резиновых нитей из латекса.

Учитывая относительную обособленность 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. Успех распространения метода математического моделирования объясняется возможностью с его помощью исследовать практически любые 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 резиновых нитей из латекса большинство научных разработок технологического и конструктивного характера решались традиционными методами и 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 и технологии внесли В. В. Черная, П. Д. Трофимович, Б. А. Майзелис, Ю. В. Грубман, Е. А. Горелик, М. С. Силонова, Т. Н. Каменщикова, В. В. Верховланцев, 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 аппаратурного оформления этих процессов при качественном получении необходимых изделий. Поэтому с целью разработки промышленного оборудования, его оптимальных режимов эксплуатации в данной работе изложены результаты исследований тепло- и массообменных закономерностей основных

технологических операций процесса изготовления резиновых нитей из латекса и предложена методология их использования для практического применения.

**Актуальность проблемы.** Ускорение научно-технического прогресса невозможно без интенсификации технологических процессов. Это касается и производства резиновых нитей из латекса. Разработки технологического и конструктивного характера для данного производства проводились опытным путем, а применяемое оборудование характеризуется завышенными массогабаритными показателями. До настоящего времени не разработаны методы расчета основных параметров технологического процесса изготовления резиновых нитей из латекса: коагуляции, промывки и вытяжки, сушки, получения лент из нитей. В связи с этим актуальными являются комплексные задачи по теоретическому и экспериментальному исследованию основных процессов изготовления резиновых нитей из латекса как базы для оптимального проектирования необходимого оборудования, поиск и внедрение новых высокоинтенсивных технологий.

**Целью работы являлось:** исследование кинетики и аппаратурно-технологическое оформление процесса получения резиновых нитей из латекса, включающего новую технологическую операцию – синерезис латексных гелей в жидких теплоносителях. Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1) теоретически и экспериментально обоснована возможность использования синерезиса латексных гелей в жидких теплоносителях для повышения эффективности процессов производства резиновых нитей;

2) экспериментально определен тип жидкого теплоносителя для процесса синерезиса латексных гелей – глицерин, обеспечивающий повышение интенсивности тепло- и массообменных процессов и качества получаемых нитей;

3) составлено математическое описание основных технологических операций процесса производства резиновых нитей из латекса: нитеобразования в ваннах коагуляции, синерезиса латексных гелей в жидком теплоносителе, воздушно-тепловой сушки резиновых нитей;

4) разработана лабораторная установка для непрерывного получения резиновых нитей из латексных гелей, проведены экспериментальные исследования процессов коагуляции, синерезиса, промывки нитей от глицерина, воздушно-тепловой сушки и образования лент из нитей, а также влияния режимных переменных на интенсивность тепло- и массопереносных процессов и качество получаемой продукции;

5) сформулированы и решены задачи оптимизации режимных переменных и конструктивных параметров процесса производства резиновых нитей из латекса, обеспечивающих минимальные массогабаритные показатели технологической линии при заданном качестве продукции и максимальной производительности оборудования;

б) разработаны рекомендации по аппаратурному оформлению линии для производства резиновых нитей диаметром до 0,6 мм и оборудованию для производства из них резиновых лент.

**Научная новизна заключается в следующем:** разработана новая технология процесса получения резиновых нитей из латекса, отличительной чертой которого является синерезис латексного геля в глицерине.

Проведены экспериментальные исследования основных технологических операций при производстве резиновых нитей из латекса. На их основе предложено математическое описание следующих процессов: коагуляции струи латекса в растворе уксусной кислоты, синерезиса латексного геля в жидком теплоносителе – глицерине и конвективной сушки.

Сформулирована и решена задача оптимизации режимных переменных и конструктивных параметров производства резиновых нитей из латекса.

**Практическая ценность заключается в следующем:** теоретически и экспериментально обоснована эффективность введения технологической операции синерезиса латексного геля в глицерине в процессе производства резиновых нитей и лент. Разработана инженерная методика и пакет программ для расчета режимных переменных и конструктивных параметров оборудования для производства резиновых нитей из латекса. Разработан проект линии по производству резиновых нитей диаметром до 0,6 мм, основанный на использовании новой технологической операции синерезиса латексного геля в глицерине. Сформулирована и решена задача оптимизации режимных переменных и конструктивных параметров производства резиновых нитей из латекса.

С использованием полученных в работе данных проведены расчеты процессов отложения латексного геля на стенках трубопроводов с целью определения периодичности профилактических работ, определена эксплуатационная надежность и оптимальная численность обслуживающего персонала линии. Габаритные размеры линии на 30% меньше существующих аналогов.

# 1. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НИТЕЙ ИЗ ЛАТЕКСА

---

## 1.1. ЛАТЕКСЫ И ИХ СВОЙСТВА

Латексы представляют собой типичный пример коллоидного состояния высокополимеров, их водную дисперсию. Различают латексы натуральные, синтетические и искусственные. Натуральные латексы представляют собой консервированный и концентрированный сок бразильской гевеи. Синтетические латексы – продукты эмульсионной полимеризации и сополимеризации различных виниловых и диеновых соединений. К ним относятся латексы полимеров и сополимеров бутадиена, изопрена, хлоропрена, пиперилена, стирола, акрилонитрила и ряда других мономеров в самых различных комбинациях и соотношениях. Искусственные латексы, получившие широкое распространение, начиная с 50-х годов XX века изготавливают механическим диспергированием растворов полимеров с последующей отгонкой растворителя. К ним относятся стереорегулярные каучуки, полисилоксаны, полимеры и сополимеры изобутилена и др.

Несмотря на различную природу вышеперечисленных латексов, все они представляют коллоидную систему, если в качестве критерия принимать величину частиц дисперсной фазы. Натуральный латекс имеет размеры частиц примерно 0,05...1,0 мкм, таковы приблизительно размеры частиц типичных и искусственных латексов.

Синтетические латексы отличаются от искусственных наличием более разрезанных адсорбционных оболочек частиц высокополимера.

Частицы латексов, как правило, имеют сферическую форму или близкую к ней. Может иметь место в устойчивых латексах образование вторичных частиц, т.е. агрегированных, но не слившихся первичных частиц (глобул).

Характер распределения частиц и их величина являются важнейшими коллоидно-химическими параметрами латексов. Обычно в латексах наблюдаются частицы разного размера, т.е. латекс в этом случае характеризуется кривыми распределения частиц по размерам. Это распределение в большинстве случаев носит асимметрический характер и может быть би- и тримодального вида. Эти параметры тесным образом связаны с вязкостью, пропитывающей способностью, скоростью сушки, прочностью и усадкой латексных изделий.

Частицы латекса как часть коллоидной системы несут электрический заряд. Заряжены они отрицательно и при пропускании постоянного электрического тока через латекс подвигаются к положительному электроду. Это явление носит название электрофореза.

В настоящее время считается, что 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 концентраций в нем каучука и лежит в пределах 9500...9800 н/м<sup>3</sup>. Одним из важнейших свойств латекса является вязкость. Как отмечается многими исследователями [33], вязкость латексов не подчиняется закону Ньютона. Несмотря на то, что вязкость играет огромную роль в технологических процессах до настоящего времени теория этого вопроса полностью не разработана.

Свежий латекс [54] показывает реакцию, которая колеблется от нейтральной (рН = 5,8). При нормальном количестве аммиака в центрифугированном концентрате его рН = 10...10,5.

Центральное место в теории коллоидной химии латексов и практического их использования занимает вопрос коагуляции. Знание закономерностей коагуляции позволяет выявить причины устойчивости латексов, а также определение оптимальных путей выделения каучука из латекса в процессе его переработки. Получение различных резинотехнических изделий из латексов связано в первую очередь с коагуляцией.

Агрегативная устойчивость латексов достигается за счет образования энергетического барьера, который препятствует сближению глобул до величин, вызывающих коагуляцию. Этот барьер определяется величиной и характером адсорбционного слоя на поверхности частиц, который состоит из молекул поверхностно-активных веществ (ПАВ) или каких-то других эмульгаторов. В свою очередь эмульгаторы могут быть ионогенными, неионогенными, водорастворимыми полимерами или функциональными группами в макромолекулах самой дисперсной фазы. С точки зрения практического использования латексов в процессе их переработки очень важно знать и разграничивать природу потенциального барьера для того, чтобы наилучшим образом выбрать вид воздействия для астабилизации (коагуляции) латекса. Основными видами или методами коагуляции латексов являются: нагревание, введение электролита, механические воздействия, замораживание–оттаивание. В настоящее время пока еще нет достаточно строгой количественной теории коагуляции латексов из-за сложности и разнохарактерности явлений, наблюдаемых при их астабилизации различными методами. Для простых коллоидных систем наиболее глубоко разработана теория Дерягина–Ландау–Вервея–Овербека (ДЛВО). Основу этой теории составляет рассмотрение взаимодействия двух частиц, разделенных слоем раствора электролита. При этом энергия их взаимодействия представляется алгебраической суммой энергий их притяже-

ния (лондоновская сила) и отталкивания (электростатическая сила). Эта теория подвержена критике в работах [25, 27], так как не учитывает целого ряда факторов, действующих реально при коагуляции.

Впервые наиболее подробно было проведено исследование устойчивости латексов к различным воздействиям А. В. Лебедевым с сотрудниками [2, 4] в зависимости от рецептуры полимеризации и ряда других факторов. В результате этих работ было сделано заключение о сложной структуре потенциального барьера и о своеобразии механизмов коагуляции под влиянием разных воздействий. Рассмотрим имеющиеся литературные источники по объяснению механизмов коагуляции латекса вышеперечисленными методами.

**Нагревание латекса.** Астабилизация латексов под воздействием высоких температур происходит в тех случаях, когда защитные агенты характеризуются малыми теплотами гидратации. Особенно заметно тепловое воздействие оказывает ПАВ. Как показано в работах [32, 34] можно считать, что механизм астабилизации латексов при нагревании происходит в результате дегидратации межфазных слоев. В случае свободного испарения влаги с поверхности латекса механизм коагуляции усложняется [35, 42, 56, 64, 71, 74, 75]. Авторы предлагают следующее объяснение подобной коагуляции. Вначале при испарении влаги повышается концентрация глобул полимера в поверхностном слое из-за малого коэффициента диффузии их в водной фазе (около  $10^{-9}$  см<sup>2</sup>/с) до состояния псевдоплотной упаковки, структура которой допускает восходящий пропуск влаги. По мере увеличения этого слоя все больше возрастает его сопротивление переносу влаги до тех пор, пока перенос влаги не станет носить чисто диффузионный характер. При таком влагопереносе происходит резкое обезвоживание поверхностного слоя с образованием плотной пленки коагулюма.

В работе [48] предпринята попытка количественного описания энергии взаимодействия частиц в зависимости от расстояния между ними. Однако теоретические расчеты по предложенным уравнениям очень сильно отличаются от экспериментальных данных. Поэтому полученная зависимость требует значительной корректировки. Как следует из проанализированных источников, в настоящее время имеются данные только количественного описания влияния повышенных температур на коагуляцию латексов и отсутствуют даже простые математические соотношения.

**Введение электролитов.** Агрегативная устойчивость ионогенных дисперсных систем зависит от состава дисперсионной среды и может быть резко снижена путем введения электролитов [14, 45, 48, 62, 72, 73, 77]. Однако до настоящего времени количественные данные о коагуляции латекса электролитами являются довольно незначительными. Указывается, что ионогенные латексы подчиняются правилу Шульце–Гарди, которое устанавливает зависимость коагулирующей силы иона от его валентности.



В работе [62] рассматривается коагуляция латексов солями кальция и цинка (двухвалентными катионами), и указывается, что количество кальция, необратимо связываемого с 1 г коагулюма (кальциевое число), не зависит от концентрации электролита и от концентрации латекса. Авторы принимают кальциевое число за меру устойчивости латекса к коагулирующему действию электролитов. По их мнению при коагуляции происходит сжатие диффузных ионных атмосфер и превращение эмульгаторов в не растворимые в воде вещества. Здесь же отмечается, что устойчивость латексов нельзя объяснить лишь электростатическим фактором стабилизации.

**Механические воздействия.** При изготовлении различных резиновых изделий из латекса приходится оказывать на него различное механическое воздействие, подвергать механическому перемешиванию, транспортированию и переработке. Поэтому очень важным вопросом является устойчивость латексов к этим воздействиям.

Как указано в ряде работ [1, 49, 50, 51, 58, 70] до сих пор нет не только количественной теории, но и единого взгляда на физическую сущность главных факторов, определяющих поведение коллоидных систем типа латексов под влиянием интенсивных напряжений сдвига.

С точки зрения гидродинамики [38, 52] механическая коагуляция дисперсий рассматривается как увеличение вероятности столкновения частиц при турбулентном режиме по сравнению с ламинарным. Однако такой подход противоречит опытным данным, когда латексы, устойчивые при длительном хранении, все-таки коагулируют при механическом перемешивании в ламинарном режиме.

В работе [70], посвященной латексам, показано, что при механических воздействиях частицам придается дополнительная энергия, которая и повышает эффективность их соударений. Дополнительные столкновения возможны лишь за счет разных скоростей движения частиц в соседних слоях, причем столкнуться могут только те частицы, траектории движения которых удалены друг от друга не больше, чем на величину их среднего диаметра (при условии монодисперсности).

Проводились исследования [1] механической коагуляции латексов в зазоре между коаксиальными цилиндрами при быстром вращении одного из них. Эксперименты по механической коагуляции дали сложную картину зависимости скорости коагуляции от интенсивности механического воздействия. На кривых имеется излом, который характеризует переход от медленной коагуляции к быстрой, т.е. показывает наличие пороговых явлений, аналогичных коагуляции электролитами. На скорость механической коагуляции влияет и размер частиц, причем увеличение их размера приводит к ускорению механической коагуляции. Рассматривая механическую коагуляцию, А. В. Лебедев выдвинул гипотезу, что коагуляция происходит за счет предварительного частичного механического отрыва

слоев от поверхности глобул, вращающихся относительно друг друга со сравнительно высокими скоростями.

Воюцкий С. С. еще ранее предвидел возможность астабилизации латекса в сдвиговом поле по десорбционному механизму, т.е. за счет уменьшения толщины гидрационных слоев. В работе [33] делается вывод о том, что к настоящему времени не существует единственного взгляда на природу коагуляции латексов.

**Замораживание–оттаивание.** При замораживании латексов происходит их коагуляция. Механизм протекания этого процесса носит чисто предположительный, без количественного описания параметров процесса. Коагуляция замораживанием имеет практическое применение только для целей хранения и транспортирования. В нашей стране нет применения указанного способа для изготовления резиновых изделий.

## 1.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛАТЕКСНЫХ НИТЕЙ

### 1.2.1. ЛИНИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛАТЕКСНЫХ НИТЕЙ

Довольно длительное время производство резиновых нитей осуществлялось резкой листов каучука или резины на полосы требуемых размеров. Для этого использовались режущие станки или валки, снабженные канавками, через которые пропускался резиновый лист. В настоящее время основную часть выпускаемых резиновых нитей получают методом продавливания латексной смеси через фильеры в коагулянт [15, 39]. Такой процесс исключает использование каландров и режущих станков, что существенно упрощает его аппаратное оформление. Однако этот метод дает хорошие результаты только при строгом соблюдении технологического режима, отличающегося высокой чувствительностью к составу латексной смеси и отклонению режимных параметров. Диаметр получаемой нити зависит не только от концентрации и вязкости латексной смеси и калибра применяемых фильер, но так же от условий истечения через фильеры, от температуры и состава коагулянта, т.е. от режимных параметров. Большое значение на качество получаемых нитей оказывают режимы сушки и вулканизации. В настоящее время промышленностью выпускаются латексные нити самого разного диаметра, в том числе, например, диаметром 0,2 мм, что невозможно получить резанием нитей из листа. Применение метода продавливания позволяет получать нити очень точного размера по диаметру, причем отклонение от номинального размера обычно не превышает 5%.

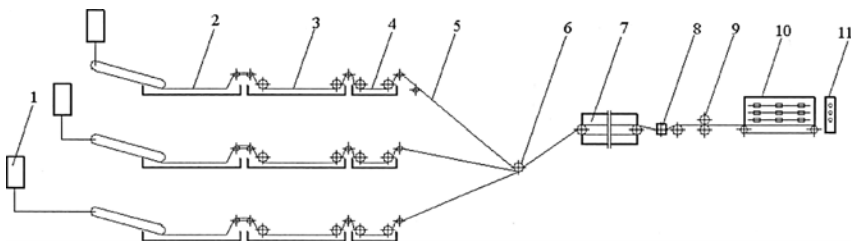
Латексные нити круглого сечения по сравнению с резаными имеют более высокую прочность и лучше сохраняют свои свойства. Они широко

применяются при изготовлении вязаных и тканых материалов, придавая им высокую эластичность и хорошее сопротивление старению. При этом изделия меньше изменяются под действием света, стирки и других воздействий. Широко нити применяются при изготовлении хирургических и спортивных изделий, предметов одежды, обивочных материалов, сеток для пищевой промышленности.

На рисунке 1.1 представлена схема линии для изготовления резиновых нитей из латекса, разработанная АО «НИИРТмаш» с технологической характеристикой:

- производительность, т/год ..... 1500
- скорость движения нитей, м/мин:
  - наименьшая ..... 13,3
  - наибольшая ..... 40,0
- количество выпускаемых нитей ..... 300
- диаметр нитей, мм ..... 0,2; 0,25; 0,4; 0,5; 0,6;
- теплоноситель ..... насыщенный пар
- рабочая среда в камере сушки ..... воздух и вулканизация
- температура в камере сушки и вулканизации, °С ..... 90...120
- мощность установленных электродвигателей, кВт ..... 60
- габаритные размеры, м ..... 76,5×7,89×4,79

Латексная смесь из бачка дозатора 1 под действием гидростатического давления или под давлением воздуха поступает через стеклянные фильтры в ванну коагуляции 2, где происходит астабилизация глобул каучука, и латексная струя превращается в гель. Из ванны коагуляции нить 5 поступает в ванны промывки 3, 4, откуда через нарезной валок 6 в камеру сушки и вулканизации 7. Далее свулканизованная нить проходит талькатор 8 и направляется или на машину образования лент 9, или на намоточную машину 10.



**Рис. 1.1** Схема изготовления резиновых нитей из латекса:

- 1 – дозатор; 2 – ванна коагуляции; 3 – первая ванна промывки; 4 – вторая ванна промывки; 5 – нить; 6 – валок; 7 – камера сушки и вулканизации; 8 – талькатор; 9 – машина образования лент; 10 – машина намоточная; 11 – укладчик лент

## 1.2.2. СИСТЕМА ПОДАЧИ ЛАТЕКСНОЙ СМЕСИ К ВАННЕ КОАГУЛЯЦИИ

Система подачи латексной смеси к ванне коагуляции предназначена для обеспечения требуемой скорости латексной струи на выходе из фильеры. На рисунке 1.2 представлена схема дозатора латексной смеси. Он состоит из привода 1, трех одинаковых цилиндрических направляющих 3, внутри которых от ходовых винтов 2, перемещаются плунжеры 4 с установленными на них весовыми устройствами 5. С помощью тяги к весам крепятся расходные бачки 6, питающие коллекторы фильер. Фильеры изготавливают из стекла и калибруют по диаметру и расходу согласно табл. 1.1.

### 1.1. Соотношение диаметров нити и фильеры

Диаметр фильер, мм	Диаметр нити, мм
0,9...1,2	0,6
0,8...0,9	0,3
0,5...0,9	0,2

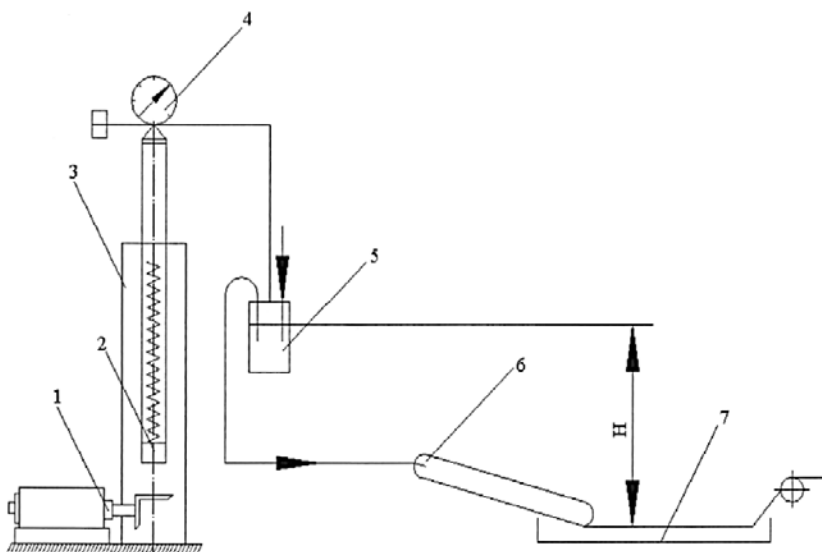


Рис. 1.2. Схема дозатора латексной смеси

Каждый из трех бачков работает независимо один от другого. Приток латексной смеси в расходный бачок регулируется электропневмоклапаном. Внутри бачка погружены две не закрепленные с ним сифонные трубки. Одна из них служит для периодического притока смеси, другая – для непрерывной подачи смеси в коллектор фильер 7. На весах расположены три датчика. Один неподвижный – для прекращения притока смеси в бачок при его заполнении. Второй – неподвижный, установленный против «О» на шкале весов, регулируемый микрометрическим винтом для установления массы контрольного расхода. Гидростатический напор  $H$ , регулируемый дозатором, служит элементом регулирования диаметра получаемых нитей. Диаметр нитей при постоянном напоре может меняться из-за возмущений, возникающих в системе дозирования. Это может быть изменение вязкости латексной смеси при колебаниях температуры, концентрации исходных компонентов и т.д.

Латексная смесь из бачка к коллектору фильер подается по гибкому трубопроводу из полихлорвинила за счет первоначального создания вакуума в коллекторе.

### 1.2.3. ВАННЫ КОАГУЛЯЦИИ И ВЫТЯЖКИ

На рисунке 1.3 представлено схематическое устройство ванны коагуляции. Ванна изготавливается из коррозионной стали 5, имеет рубашку 2 для циркуляции горячей воды и теплоизоляцию 4 стенки. Горячая вода в рубашке позволяет поддерживать требуемый температурный режим коагуляционного процесса. Уксусная кислота поступает в ванну через приемник с отверстиями и питающий каналчик. Уровень кислоты в ванне определяется переливной канавкой 1, через которую она сливается. В ваннах коагуляции установлены разделители 3 из коррозионной стали, предназначенные для разделения и упорядочения движения нитей 6 к тянущим валкам.

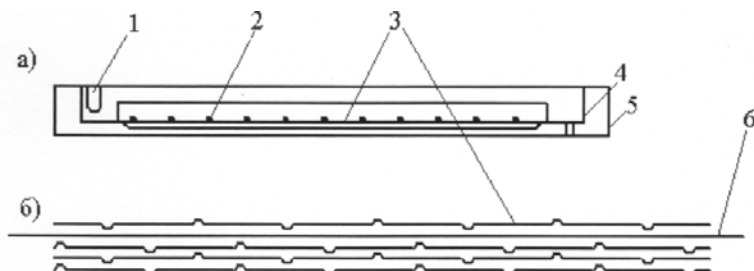


Рис. 1.3. Схема ванны коагуляции

Движение кислоты и нитей совпадает. Над ваннами коагуляции установлен зонд аспирации для отсоса паров кислоты и влаги. При коагуляции латексной смеси в ванне коагуляции происходит изменение концентраций уксусной кислоты и ацетата цинка. Для поддержания постоянства их концентрации используется установка дозирования и циркуляции раствора уксусной кислоты. Отработанный раствор частично или полностью отводится в бак для регенерации. Регенерация производится подачей определенных порций концентрированной уксусной кислоты и ацетата цинка в отработанный раствор. Смешанный раствор поступает в ванну коагуляции.

Из ванны коагуляции латексная нить направляется в первую и вторую ванны промывки, где она отмывается от уксусной кислоты и некаучуковых проточной водой с температурой 60...80 °С. С точки зрения самого процесса изготовления нитей вытяжка имеет положительное значение, так как за счет этого происходит регулирование поперечного сечения нитей и упрочнение за счет продольной ориентации молекул каучука. Чем тоньше нить, тем качественнее изделие и меньше расход латекса.

#### 1.2.4. КАМЕРА СУШКИ И ВУЛКАНИЗАЦИИ

Наиболее важной и ответственной операцией в изготовлении резиновых нитей из латекса является сушка, которая занимает до 80% всего технологического времени. Сушка нитей проводится в среде горячего воздуха.

После коагуляции нить представляет собой коллоидное капиллярно-пористое тело, гель. Процесс превращения геля в монолитную резину можно разделить на два периода: период постоянной скорости можно рассматривать как испарение от свободной поверхности; период падающей скорости, в котором происходит уменьшение интенсивности конвективного переноса влаги в слое геля. При испарении влаги глобулы каучука в геле сближаются, образуя капилляры, по которым влага поднимается к поверхности испарения. После слияния глобул и образования монолитной поверхностной пленки капиллярный перенос влаги заменяется на диффузионный. Эта специфическая особенность возникновения поверхностной пленки является главным препятствием на пути интенсификации процесса сушки, так как повышение температуры теплоносителя приводит к браку нитей из-за образования пор и пузырей.

На рисунке 1.4 представлена схема камеры сушки и вулканизации, а в табл. 1.2 указаны значения температур по зонам сушки и вулканизации. Внутри камеры движется транспортерная лента, несущая на себе латексные нити. Поток воздуха над лентой создают вентиляторы. На пути движения воздуха установлены паровые калориферы, в которых они нагреваются до требуемой температуры. Кроме того, в зоне вулканизации под транспортерной лентой и над ней установлены нагревательные плиты,

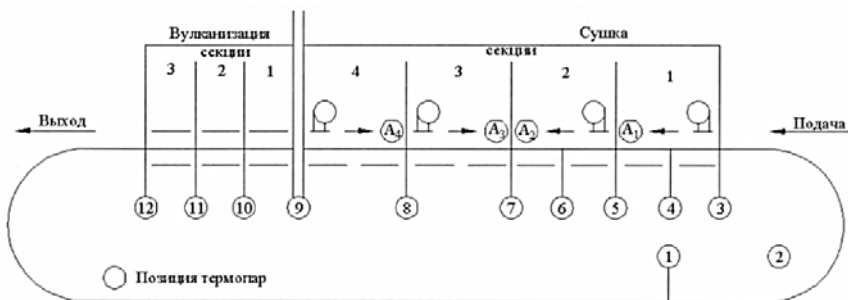


Рис. 1.4. Схема камеры сушки и вулканизации с расположением термопар

## 1.2. Значения температур по зонам сушки и вулканизации

Диаметр нитей, мм	Температура воздушной среды по зонам сушки, °С				Температура транспортной ленты в зоне вулканизации, °С по номерам термопар											
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,6	105	105	108	115	92	100	94	94	98	98	104	108	118	136	140	145
0,3	105	105	110	118	98	106	100	100	103	103	108	112	112	140	145	145
0,2	105	105	114	128	130	110	103	103	104	104	108	112	112	145	148	150

обогреваемые паром. Скорость перемещения транспортной ленты и температура в различных зонах камеры сушки и вулканизации устанавливается в зависимости от диаметра нитей и состава латексной смеси.

Привод транспортной ленты и системы тянущих валков, установленных на ваннах коагуляции и промывки, осуществляется от двигателя постоянного тока, системы редукторов, вариаторов, валков и цепных передач. После выхода нитей из камеры сушки и вулканизации их опудривают тальком на талькаторе для предотвращения слипания после их намотки на катушки.

### 1.2.5. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА НИТЕЙ И ЛЕНТ

Контроль качества нитей заключается в соответствии диаметра и физико-механических показателей нити техническим требованиям.

Проверка диаметра производится толщиномером типа ТР-10 с ценой деления 0,01 мм на длине нити 500 мм в трех любых точках, находящихся на расстоянии друг от друга не менее 20 мм. Истинным диаметром нити при замере толщиномером считается его показание с учетом поправки на сжатие. Поправка представляет собой разность показаний диаметра нити под микроскопом и по толщиномеру.

Нити проверяются на такие физико-механические показатели, как модуль, прочность и удлинение при разрыве, усилие расслаивания нитей в ленте. Прочность и удлинение нити при разрыве определяют по результатам испытаний на разрывной машине, в зажимах которой закрепляется образец длиной не менее 100 мм. Образец растягивается со скоростью 500 мм/мин, и в момент разрыва фиксируется нагрузка и удлинение. Прочность определяется как среднеарифметическое по испытаниям 50 образцов.

Усилие расслаивания двух нитей в ленте выражают в миллиньютон-нах (мН) и определяют по формуле

$$f = \frac{9,8F}{n-1}, \quad (1.1)$$

где  $F$  – усилие расслоения нитей в ленте, фиксируемое по шкале значение разрывной машины, Н;  $n$  – количество нитей в ленте.

Образец для испытаний представляет собой отрезок ленты длиной примерно 300 мм. С одного конца образца на расстоянии 20...39 мм от края с помощью тонкого острого предмета разделяют все нити на две группы чередующихся нитей (четных и нечетных). Концы нитей указанных групп склеивают лейкопластырем и закрепляют в зажимах разрывной машины. Испытания проводят при скорости движения зажима 500 мм/мин. Рабочий участок ленты не менее 100 мм.

Требования к латексным нитям по диаметру и физико-механическим показателям нитей и требования к диаметрам представлены в табл. 1.3 и 1.4. Диаметр нитей (по показаниям толщиномера TP-10).

### 1.3. Точность изготовления нитей

Номинальный, мм	Отклонения, мм
0,2	0,02
0,25	0,02
0,3	0,02
0,6	0,05
0,7	0,05



#### 1.4. Физико-механические показатели

Показатели	Норма
Предел прочности при разрыве, МПа	Не менее 24
Относительное удлинение при разрыве, %	Не менее 560
Относительное остаточное удлинение (после растяжки на 500%), %	Не более 8
Коэффициент старения по пределу прочности в воздушной среде при 70 °С в течение 24 часов	Не менее 0,85

#### Выводы по главе 1

Интенсифицировать процесс изготовления нитей при существующей технологии довольно затруднительно. Так, стремление к увеличению производительности требует увеличения размеров ванн коагуляции и промывки и особенно увеличение длины камеры сушки и вулканизации. Желание увеличить производительность приводит к непропорциональному росту расходов на изготовление и эксплуатацию требуемого оборудования. Кроме того, до настоящего времени нет инженерной методики расчетов основных процессов технологии изготовления латексных нитей.

Поэтому повышение эффективности процессов производства резиновых нитей и лент из латекса диктует необходимость поиска новых технологических решений, позволяющих интенсифицировать процесс тепло- и массопереноса. Необходима постановка и решение комплексных задач по теоретическому и экспериментальному исследованию основных технологических операций процесса изготовления резиновых нитей из латекса с установлением математических зависимостей выходных параметров с действующими на процесс факторами, как базы для оптимизации оборудования при его проектировании.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РЕЗИНОВЫХ НИТЕЙ ИЗ ЛАТЕКСА

### 2.1. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РЕЗИНОВЫХ НИТЕЙ ИЗ ЛАТЕКСА

На основании технологического процесса изготовления латексных нитей, описанного в п. 1.2, можно составить его структурную схему, которая показана на рис. 2.1.

Основными технологическими операциями можно принять дозирование, коагуляцию, промывку–вытяжку, сушку–вытяжку, сушку–вулканизацию и образование лент из нитей.

В системе дозирования входными параметрами являются гидростатический напор  $H$  и количество подаваемой насосом в дозатор смеси  $Q_1$ . Входным параметром будет расход латексной смеси  $Q_2$  в коллекторе фильтр.

При коагуляции выходными параметрами могут быть: диаметр латексной струи или ее радиус  $R$ , скорость движения струи  $v$  и коэффициент диффузии коагулянта  $D$ . Выходным параметром является значение концентрации каучука  $c$  в струе латексного геля.

В ваннах промывки и вытяжки входными параметрами будут диаметр валков  $D_b$ , число оборотов валков  $n$ , время промывки  $\tau_{пр}$ . Выходными параметрами являются радиус нити  $r_n$  и напряжение в ней  $\sigma$ .

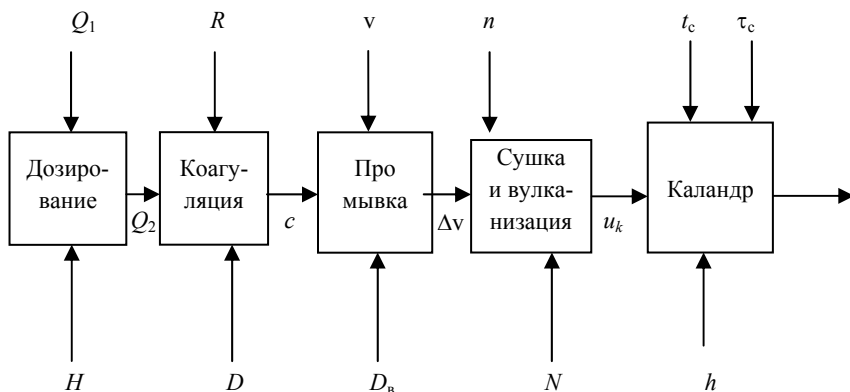


Рис. 2.1. Структурная схема изготовления резиновых нитей

При сушке–вулканизации входными параметрами могут быть: время сушки–вулканизации  $\tau_c$ , температура сушки–вулканизации  $t_c$ , число зон нагрева  $N$ . Выходными параметрами считаем диаметр или радиус готовой нити  $r_n$  и величину напряжения нити при разрыве  $\sigma_p$ , рассчитываемого на начальный диаметр нити.

Управляющими параметрами являются: скорость истечения струи  $v$  или расход латексной смеси  $Q$ , время промывки  $\tau_{пр}$ , число оборотов валков  $n$ , температура сушки–вулканизации  $t_c$ , время сушки–вулканизации  $\tau_c$ .

Математические зависимости между входными и выходными параметрами технологического процесса изготовления латексных нитей будут представлять его математическую модель, на основе которой можно ставить и решать задачи оптимизации по различным критериям.

## **2.2. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ РЕЗИНОВЫХ НИТЕЙ ИЗ ЛАТЕКСА**

Как следует из анализа современного состояния технологии и оборудования изготовления нитей из латекса, рассмотренного в главе 2, основным проблемным вопросом является почти полное отсутствие теории переработки латекса в готовое изделие. Это касается транспортирования и дозирования латекса, его коагуляции, синерезиса, сушки, образования лент, что является предметом настоящего теоретического и экспериментального исследования.

При изготовлении нитей из латекса обязательной технологической операцией является термообработка (сушка и вулканизация). Наиболее важной и ответственной является сушка, на которую расходуется до 80% всего технологического времени. Одним из путей снижения энергозатрат и сокращения времени на сушку является применение высокотемпературных теплоносителей.

В работах [22, 23] указывается, что сушка и термообработка в жидких средах позволяет снизить энерго- и материалоемкость теплотехнических установок из-за ряда преимуществ жидкого теплоносителя по сравнению с газообразным сушильным агентом. Эти преимущества заключаются в том, что жидкие теплоносители обеспечивают в 100 – 1000 раз более высокую интенсивность теплообмена; коэффициенты внутреннего переноса влаги возрастают на 2–3 порядка; в жидких теплоносителях обеспечивается более однородное температурное поле, что повышает температурный напор; при термообработке отсутствует свободный кислород, что уменьшает опасность пожара даже при использовании теплоносителя с высокой температурой.

Для проверки эффекта сушки латексных гелей в высокотемпературном теплоносителе были взяты жидкости: глицерин, этиленгликоль и силиконовая жидкость. Глицерин и этиленгликоль хорошо смешиваются с водой, силиконовая жидкость не смешивается с водой.

Пробные эксперименты проводились по сушке латексного геля на стеклянных формах. Гель получали методом ионного отложения. Так сушка в глицерине при температуре 136 °С в течение 3 мин визуального брака в виде пор и пузырей не наблюдалось. При обработке в силиконовой жидкости с выдержкой более 10 с на поверхности пленки возникали и рвались пузыри. Кроме того, повышение температуры нагрева силиконовой жидкости, а также этиленгликоля, приводит к образованию летучих компонентов с неприятным запахом и раздражающим действием на слизистую оболочку глаз и носоглотки, т.е. оказывает вредное воздействие на организм человека. Поэтому использование в производственных условиях этиленгликоля и силиконовой жидкости неприемлемо.

Можно предположить, что термообработка в силиконовой жидкости очень быстро образует на поверхности геля тонкий и плотный слой, который закупоривает влагу в остальном объеме пленки и при мощном теплоподводе часть закупоренной между глобулами влаги вскипает, образуя пузыри.

При термообработке в глицерине и этиленгликоле механизм влагоудаления следующий: в начальный момент контакта геля с глицерином влага в поверхностном слое смешивается с глицерином. Капиллярные межглобулярные каналы полностью не закупориваются, и влага из геля уходит беспрепятственно, пузыри на поверхности не образуются.

Учитывая преимущества сушки в глицерине по сравнению с сушкой в силиконовой жидкости и этиленгликоле, в дальнейшем все эксперименты проводились с использованием глицерина.

Исходя из вышеизложенного, проведение экспериментальных исследований было направлено на выяснение влияния температуры глицерина и времени термообработки на процесс сушки латексных нитей и их физико-механических свойств.

### **2.3. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ПОЛУЧЕНИЯ РЕЗИНОВЫХ НИТЕЙ ИЗ ЛАТЕКСА**

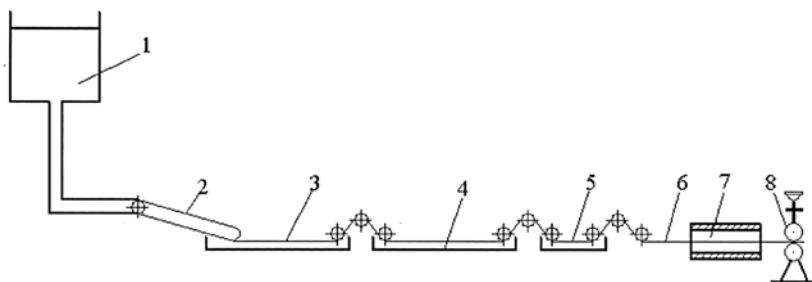
Для проведения экспериментальных исследований основных процессов получения резиновых нитей из латекса с учетом введения новой технологической операции синерезиса в глицерине, а также процесса образования из них лент, была разработана лабораторная установка непрерывного действия (рис. 2.2). Она состоит из бачка 1, в который заливается латексная смесь. Бачок имеет возможность менять свое положение по высоте, создавая необходимый гидростатический напор. Латексная смесь из

бачка по эластичной трубе поступает в фильеру 2, выполненную из стекла с калиброванным выходными отверстием, соответствующим диаметру выпускаемых нитей. Конец фильеры опускается в ванну коагуляции 3, заполненную раствором уксусной кислоты, являющейся коагулянтом латексной смеси. Из ванны коагуляции нить 6 через систему вращающихся валков направляется в ванну 5, которая заполняется жидким теплоносителем. Ванна с жидким теплоносителем состоит из корпуса с термоизоляцией, в котором установлен теплонагревательный элемент (ТЭН). Температура теплоносителя измеряется ртутным термометром. Проведение экспериментальных исследований было направлено на выяснение влияния режимных переменных на кинетику процессов коагуляции, синерезиса, промывки и сушки, а также на качественные показатели получаемых резиновых нитей.

Концентрацию каучука в образцах определяли методом взвешивания до и после тепловой обработки. Концентрацию ионов коагулянта (уксусной кислоты) в геле осуществляли на хроматографе «Кристалл-2000М». Физико-механические показатели образцов (прочность при разрыве и относительное удлинение) определяли путем испытаний на разрывной машине типа ЦМГИ-250.

Скорость движения нити рассчитывалась по числу оборотов выходного валка. Обороты валка определялись визуально по метке на валке и показаниям секундомера. Частота вращения валка регулировалась потенциометром.

Для экспериментов по образованию лент из нитей использовался каландр 8, который представляет собой два валка, между которыми пропускаются нити. Зазор между валками измерялся щупом, а его регулировка – гайками с двух сторон подвижного верхнего валка.

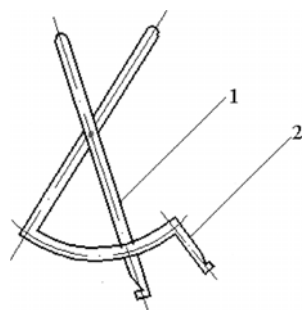


**Рис. 2.2. Схема лабораторной установки для непрерывного получения резиновых нитей из латекса:**  
 1 – бачок с латексной смесью; 2 – фильера; 3 – ванна коагуляции;  
 4 – ванна с жидким теплоносителем; 5 – ванна промывки;  
 6 – латексная нить; 7 – сушилки; 8 – каландр

Методика проведения экспериментов состояла в следующем: первоначально готовили латексную смесь на основе технологического регламента № 52797. Исходным сырьем являлся натуральный латекс МАРДР-1135 X с добавкой дисперсии вулканизирующих, затем латексная смесь заливалась в бачок 1. Ванна коагуляции 3 заполнялась 2%-ным раствором уксусной кислоты, а ванна 5 – водой или глицерином, в зависимости от требований эксперимента.

Устанавливалась частота вращения валков определенного режима, затем открывался зажим на эластичной трубе, и латексная смесь начинала вытекать из фильеры, образуя около выхода сгусток коагулюма, который захватывался пинцетом и медленно вытягивался через ванну коагуляции на ведущий валок и далее через валки ванн с жидким теплоносителем на выходной валок.

Проведенные исследования показали работоспособность установки и возможность получения латексных нитей. Для проведения экспериментальных исследований по термообработке оказалось более корректно использовать отбор нитей с ванны коагуляции, что позволяет точнее оценить влияние фактора времени на процесс. Для отбора образцов латексной нити с работающей установки была изготовлена специальная оправка, которая показана на рис. 2.3. Она состояла из двух ножек: подвижной и неподвижной. Данное устройство позволяло отбирать нить требуемой длины и погружать ее в ванну с теплоносителем. Длина образцов нити бралась в пределах 150...200 мм.



**Рис. 2.3. Оправка для отбора образцов латексной нити:**

- 1 – подвижная ножка;
- 2 – неподвижная ножка

## 2.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Термообработка проводилась путем полного погружения нити в глицерин. Температура глицерина менялась в диапазоне от 100 до 140 °С. Время выдержки составляло для каждой серии экспериментов при выбранной температуре от 1 до 30 с.

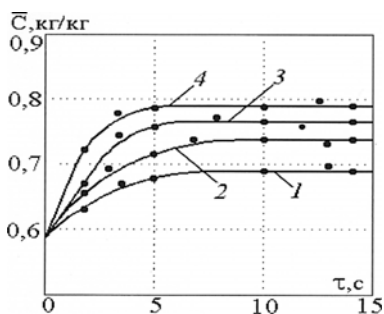
Экспериментальные исследования показали, что концентрация каучука в геле при высокотемпературном синерезисе за очень короткое время достигает своих равновесных значений, соответствующих температуре обработки. На рисунке 2.4 в качестве примера представлены кривые изменения средней концентрации  $c$  каучука в геле при высокотемпературном синерезисе. Однако, при повышении температуры глицерина ухудшается качество нити из-за порообразования. На рисунке 2.5 показано

начало порообразования в нитях различного диаметра при различной температуре и выдержке в глицерине, а также в воздушной среде.

Как видно из графика, с увеличением диаметра нити для возникновения пузырей требуется больше времени выдержки в глицерине. Наиболее быстрое возникновение пузырей наблюдалось при воздушной термообработке.

Механизм образования дефектов нити в виде пузырей можно объяснить следующим образом. При обработке в воздушной среде очень быстро образуется поверхностная, монолитная резиновая пленка из-за испарения влаги с поверхности нити. Эта пленка закупоривает влагу внутри нити и при дальнейшем нагреве она вскипает и разрушает наружный монолитный слой с образованием брака в виде пузырей и каверн.

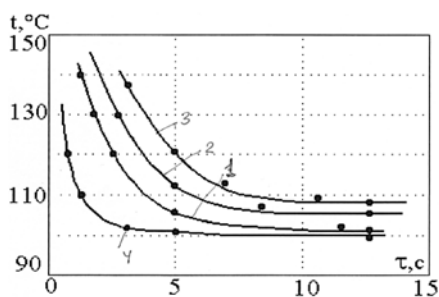
При термообработке в глицерине механизм влагоудаления носит несколько иной характер. Как известно, латексный гель представляет собой капиллярно-пористое тело, где глобулы каучука составляют гексагональную упаковку с капиллярными каналами. При воздействии на гель повышенной температуры влага из него удаляется по этим каналам, при этом поверхностная пленка образуется более медленно, потому что выжимаемая из геля влага смешивается с глицерином, препятствуя образованию монолитной поверхностной пленки. Однако с ростом температуры глицерина и времени выдержки в нем нити, вероятность возникновения дефектов возрастает. Таким образом, экспериментальные данные (рис. 2.5) определяют ограничения на технологические переменные при проведении процесса синерезиса в глицерине. Для удаления остаточной влаги из геля использовалась воздушно-тепловая сушка при различной температуре и



**Рис. 2.4.** Изменение концентрации каучука в геле при высокотемпературном синерезисе,  $d = 0,6$  мм:

1 –  $t = 100$  °C; 2 –  $t = 110$  °C;

3 –  $t = 120$  °C; 4 –  $t = 140$  °C



**Рис. 2.5.** Начало порообразования в латексной нити при обработке в глицерине при диаметре нитей:

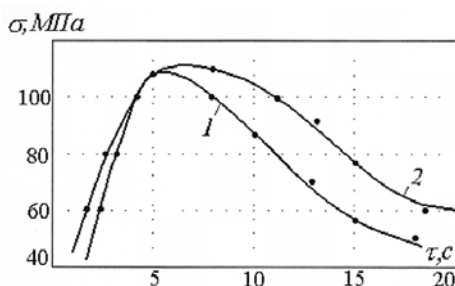
1 –  $d = 0,3$  мм; 2 –  $d = 0,6$  мм;

3 –  $d = 0,9$  мм и в воздушной среде:

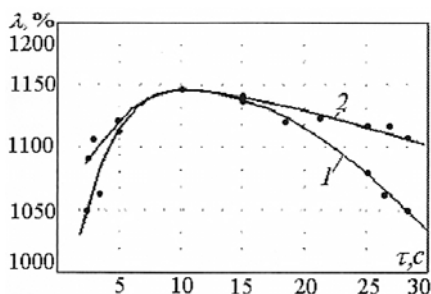
4 –  $d = 0,9$  мм

времени выдержки не более 5 с для этой температуры (рис. 2.5). Латексные нити должны соответствовать определенным физико-механическим показателям, которые указаны в технических условиях. Таковыми показателями являются: предел прочности при разрыве  $\sigma_p > 24$  МПа, относительное удлинение при разрыве  $X > 560\%$ .

На основе анализов качественных показателей оказалось, что при обработке в глицерине улучшается внешний вид образцов. Они имеют более бархатистую поверхность, мягкость и эластичность, чем образцы после воздушной сушки. При этом физико-механические показатели нити соответствуют требованиям технических условий, что видно из рис. 2.6 и 2.7. Таким образом, экспериментальные данные (рис. 2.5) определяют ограничения на технологические переменные при проведении процесса синерезиса в глицерине. Максимальная прочность нити достигается при вы-



**Рис. 2.6.** Зависимость прочности нити диаметром 0,6 мм при использовании различной продолжительности синерезиса в глицерине при температуре:  
1 – 140 °C; 2 – 110 °C



**Рис. 2.7.** Зависимость относительного удлинения нити диаметром 0,6 мм при использовании синерезиса различной продолжительности в глицерине при температуре:  
1 –  $t = 110$  °C; 2 –  $t = 140$  °C



держке в глицерине в течение 5...7 с. Уменьшение прочности при малом времени выдержки можно объяснить недовулканизованностью нити, а при увеличении времени выдержки более 7 с, образуются внутренние дефекты из-за порообразования. Как уже указывалось, при высокотемпературном синерезисе геля в глицерине не удается полностью удалить из него влагу. Для этого необходимо проводить его досушивание в воздушной среде.

Как показали экспериментальные исследования, совмещение процесса синерезиса в глицерине и воздушной сушки сокращают время проведения процесса в 1,3–1,4 раза по сравнению с конвективной сушкой. Качество обработанных в глицерине образцов более высокое, чем образцов после воздушной сушки. Термообработка в глицерине более целесообразна также с экономической точки зрения, так как при этом уменьшается расход тепла, и оборудование для осуществления этого процесса более компактно и менее металлоемко.

Эксперименты проводились с образцами нити, которые обрабатывались в глицерине при различной температуре 110 °С, затем промывались в воде в течение 2 с и досушивались в термошкафу при различной температуре до постоянного веса. В результате экспериментов установлено, что при повышении температуры сушки выше 120 °С, происходит ухудшение качества нитей. Таким образом, экспериментально определено ограничение на температуру в сушильной камере, при этом общее время удаления влаги из нитей с использованием глицерина с досушиванием в термошкафу сокращается по сравнению с традиционной технологией более чем в 1,3–1,4 раза.

## **Выводы по главе 2**

1. Совмещение термообработки в глицерине с конвективной сушкой сокращает время проведения процесса в 1,3–1,4 раза по сравнению с конвективной.

2. Качество обработанных в глицерине образцов более высокое. Они имеют бархатистую поверхность, мягкость и эластичность, лучший внешний вид, чем образцы после воздушной сушки.

3. Термообработка в глицерине более целесообразна с экономической точки зрения, так как при этом уменьшается расход тепла и оборудование для осуществления этого процесса более компактно и, следовательно, менее металлоемко.

4. Термообработку погруженных нитей целесообразно проводить при температуре с выдержкой не более 5 с, при этом наблюдаются наилучшие показатели прочности резиновых нитей.

5. После синерезиса необходимо проводить промывку нитей продолжительностью до 2 с.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ РЕЗИНОВЫХ НИТЕЙ ИЗ ЛАТЕКСА

---

#### 3.1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА НИТЕОБРАЗОВАНИЯ В ВАННЕ КОАГУЛЯЦИИ

При изготовлении резиновых нитей из латекса, как уже указывалось, пользуются методом его продавливания через фильеры, которые устанавливаются в ванне с разбавленной уксусной кислотой, являющейся коагулянтом для латекса. Под действием положительных ионов коагулянта отрицательно заряженные глобулы латекса теряют свой заряд, астабилизируются и объединяются, происходит процесс коагуляции латекса и отложения геля. Механизм этого процесса аналогичен ионному отложению или коагуляции латекса электролитами.

В настоящее время часть оборудования для изготовления резиновых нитей из латекса, связанная с процессом коагуляции, не рассчитывается ввиду отсутствия теории этого вопроса. Конструкции ванн коагуляции, скорость истечения латекса из фильер и ряд других технологических параметров выбираются на основе практики использования работающего оборудования.

Рассмотрим коагуляцию струи латекса при ее втекании в ванну коагуляции. Механизм этого процесса можно представить следующим образом. При истечении струи латекса происходит ее контакт по поверхности с коагулянтом. Глобулы каучука в поверхностном слое астабилизируются, образуя пленку коагулюма, толщина которой в момент контакта определяется диаметром глобул. В следующий момент времени коагуляция уже зависит от концентрации ионов, которые должны продиффундировать через пленку коагулюма. При этом процесс отложения становится диффузионным, и определяющей величиной в нем является концентрация ионов на границе «гель–латекс».

Выделим элемент латексной струи (рис. 3.1) и рассмотрим в нем процесс диффузии ионов электролита.

В качестве математического описания процесса диффузии ионов используем известное уравнение [41, 81]

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right) - v_x \frac{\partial c}{\partial x}. \quad (3.1.1)$$

Уравнение (3.1.1) представляет собой уравнение диффузии ионов коагулянта в движущейся струе латекса.

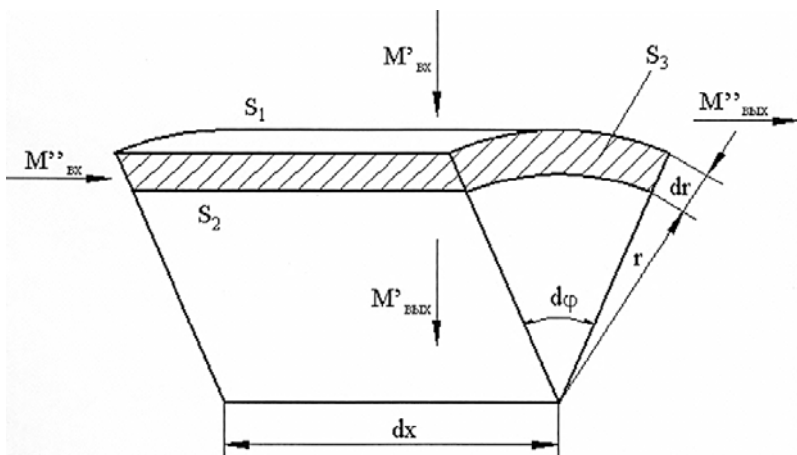


Рис. 3.1. Элемент латексной струи при коагуляции

Нарастание слоя геля в струе зависит от концентрации ионов коагулянта на границе «гель–латекс». Выделим элемент струи (рис. 3.2) и рассмотрим схему нарастания геля.

За время  $dt$  образуется слой геля толщиной  $dr$ , на такую же величину уменьшается радиус  $r_n$  границы «гель–латекс».

Количество геля на входе и выходе элемента длиной  $dx$ :

$$Q_1 = S_1 v_x ; \quad (3.1.2)$$

$$Q_2 = S_2 v_x , \quad (3.1.3)$$

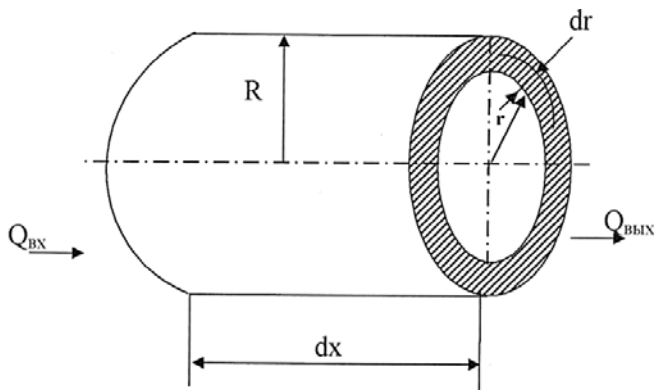


Рис. 3.2. Элемент латексной струи при гелеобразовании

где

$$S_1 = \pi(R - r_n), \quad S_2 = \pi[R^2 - (r_n - dr)^2] = \pi[R^2 - r_n^2 + (2r_n - dr)dr],$$

$R$  – радиус струи латекса.

Накопление геля

$$dV = (Q_1 - Q_1 + Q_0) d\tau, \quad (3.1.4)$$

где  $Q_0$  – количество образовавшегося геля.

С целью упрощения решения поставленной задачи делаем допущение о том, что скорость образования геля пропорциональна концентрации ионов электролита в струе, т.е.

$$W = -Kc(r_n, \tau), \quad (3.1.5)$$

где  $K$  – константа;  $c(r_n, \tau)$  – определяется из уравнения (3.1.7)

$$Q_0 = -\frac{2\pi}{\gamma_r} (r_n - dr) Kc(r_n, \tau) dx, \quad (3.1.6)$$

тогда  $\gamma_r$  – объемный вес геля.

После подстановки значения величин из (3.1.2 – 3.1.6) в (3.1.4) и преобразования получим

$$\frac{\partial r_n}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial r_n}{\partial x} = -\frac{K}{\gamma_r} c(r_n, \tau). \quad (3.1.7)$$

Уравнение (3.1.7) показывает динамику образования слоя геля в латексной струе при прохождении через ванну коагуляции. Математическая модель работы ванны коагуляции может быть описана уравнениями (3.1.1) и (3.1.7), при этом принято, что коэффициент диффузии  $D$  считается величиной постоянной, хотя в действительности, он зависит от свойств образующего геля, его проницаемости [76].

Первоначально поставим задачу решения уравнения (3.1.1), т.е. задачу распределения концентрации ионов электролита в струе, принимая коэффициент диффузии величиной постоянной.

В точке, показанной на рис. 3.3, находящейся на расстоянии  $x$  от входа в ванну и расстоянии  $r$  от оси струи в момент времени  $\tau$ , будет концентрация

$$c = c(\tau, r, x).$$

На боковой поверхности струи концентрация равна концентрации в ванне и будем считать, что

$$c_H = c(\tau, R, x). \quad (3.1.8)$$

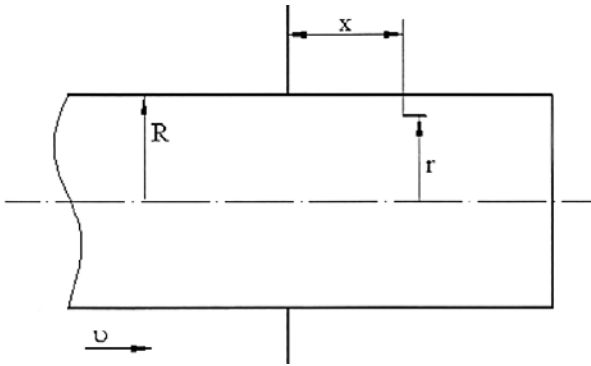


Рис. 3.3. Схема движения нити в ванне коагуляции

На правом торце струи, где  $x = v_x \tau$  аналогично

$$c_H = (\tau, r, v_x, \tau). \quad (3.1.9)$$

На входе в ванну при  $x = 0$  считаем  $r_H = R$  или

$$c(\tau, r, 0) = 0 \quad \text{при } r < R. \quad (3.1.10)$$

Зависимости (3.1.8 – 3.1.10) являются граничными условиями. Решение уравнения (3.1.1) будем искать в виде

$$\tilde{c}(\tau, r, x) = u(r)V(\tau, x). \quad (3.1.11)$$

Тогда граничные условия можно переписать в виде

$$\tilde{c}(\tau, r, 0) = [\varphi(r) - c_H] \delta(v_x \tau),$$

где  $\varphi(r)$  и  $\delta(v_x \tau)$  – функции, обладающие свойствами

$$\varphi(r) = 0, \quad \varphi(R) = c_H, \quad \tilde{c}(\tau, r, v_x \tau) = 0, \quad (3.1.12)$$

$$\delta(0) = 0, \quad \delta(v_x \tau) = 1, \quad \tilde{c}(\tau, r, x) = 0. \quad (3.1.13)$$

Подставим (3.1.11) в уравнение (3.1.1):

$$u \frac{\partial V}{\partial \tau} + \frac{\partial V}{\partial x} u = DV \left( \frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} \right).$$

Разделяем переменные

$$\frac{1}{DV} \left( \frac{\partial V}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial V}{\partial x} \right) = \frac{1}{u} \left( \frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} \right) = -K^2,$$

где  $K$  – постоянная.

Получим систему из двух уравнений:

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} + K^2 u = 0; \quad (3.1.14)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial V}{\partial x} + DK^2 V = 0. \quad (3.1.15)$$

Уравнение (3.1.11) есть уравнение Бесселя, общее решение которого имеет вид

$$u(r) = c_1 J_0(kr) \quad [60],$$

где  $c_1$  – произвольная постоянная;  $J_0(kr)$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Так как  $c_1 \neq 0$ , то с учетом условия (3.1.13) имеем

$$J_0(\mu) = 0, \quad (3.1.16)$$

где  $\mu = kR$ .

Уравнение (3.1.16) имеет бесчисленное множество корней:

$$\mu_n = k_n R.$$

Решение будет выглядеть в виде ряда по функциям

$$J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right),$$

$n = 1, 2, \dots$  с коэффициентами, определенными из уравнения

$$\frac{\partial V_n}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial V_n}{\partial x} + D\left(\frac{\mu_n}{R}\right)V_n = 0. \quad (3.1.17)$$

Найдем общее решение уравнения (3.1.17). Для этого сделаем следующие преобразования:

$$V_n(\tau, x) = z(\bar{y}, \bar{x}), \quad \bar{y} = v_x \tau, \quad \bar{x} = x,$$

откуда

$$\frac{\partial V_n}{\partial \tau} = \frac{\partial z}{\partial y} v_x,$$

$$z = \Omega(\bar{y}) \exp\left[-\frac{D}{v_x} \left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2 \bar{x}\right], \quad (3.1.18)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial V_n}{\partial x} &= -\frac{\partial z}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial z}{\partial \bar{x}}, \\ \frac{\partial z}{\partial \bar{y}} v_x + v_x \left( -\frac{\partial z}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial z}{\partial \bar{x}} \right) + D \left( \frac{\mu_n}{R} \right)^2 z &= 0, \\ \frac{\partial z}{\partial \bar{x}} &= -\frac{D}{v_x} \left( \frac{\mu_n}{R} \right)^2 z.\end{aligned}\tag{3.1.19}$$

где  $\Omega(\bar{y})$  – произвольная функция.

Тогда общее решение уравнения (3.1.17) можно представить в виде

$$V_n(\tau, x) = \Omega(v_x \tau - x) \exp \left[ -\frac{D}{v_x} \left( \frac{\mu_n}{R} \right)^2 \right] x.\tag{3.1.20}$$

В силу граничного условия (3.1.12)  $V_n(\tau, v_x \tau)$ .

Из этого вытекает, что функция  $\Omega$  должна удовлетворять условию

$$\Omega_n(0) = 0.$$

Таким образом, общее решение уравнения (3.1.11), удовлетворяющее условиям (3.1.8) и (3.1.9), будет

$$\tilde{c}(\tau, r, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \Omega(v_x \tau - x) \exp \left[ -\frac{D}{v_x} \left( \frac{\mu_n}{R} \right)^2 \right] x J_0 \left( \frac{\mu_n}{R} \right).\tag{3.1.21}$$

Следовательно, решение (3.1.21) будет удовлетворять задаче (3.1.1), если оно удовлетворяет условию (3.1.10)

$$[\varphi(r) - c_H] \delta(v_x \tau) J_0 \left( \frac{\mu_n}{R} \right).$$

В силу того, что функции  $J_0 \left( \frac{\mu_n}{R} \right)$  ортогональны и полны, функция

$\Omega_n(v_x \tau)$  определяется по формулам:

$$\begin{aligned}\Omega_n(v_x \tau) &= \frac{2}{R^2 J_1^2(\mu_n)} \int_0^R r [\varphi(r) c_H] \delta(v_x \tau) J_0 \left( \frac{\mu_n}{R} \right) dr = \\ &= \frac{2 \delta(v_x \tau)}{R^2 J_1^2(\mu_n)} \int_0^R r [\varphi(r) c_H] J_0 \left( \frac{\mu_n}{R} \right) dr.\end{aligned}$$

Окончательное решение уравнения (3.1.1) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \tilde{c}(\tau, r, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\delta(v_x \tau - x)}{R^2 J_1^2(\mu_n)} \left[ \int_0^R r [\varphi(r) - c_H] J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) dr \right] \times \\ \times \exp\left[-\frac{D}{v_x} \left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2 x\right] x J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right), \end{aligned} \quad (3.1.22)$$

где  $J_1(\mu_n)$  – функция Бесселя первого рода первого порядка.

Ввиду того, что явление на торце струи имеет место только после начала движения и в дальнейшем никакого влияния на рассматриваемый процесс не оказывает, то ограничение (3.1.10) можно записать как

$$c(\tau, r, 0) = 0. \quad (3.1.23)$$

Тогда функция  $\Omega(v_x \tau)$  определяется по формулам:

$$\Omega(v_x \tau) = \frac{2c_H}{R^2 J_1(\mu_n)} \int_0^R r J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) dr \quad (3.1.24)$$

и уравнение (3.1.22) будет иметь вид

$$\tilde{c}(\tau, r, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2c_H}{R^2 J_1(\mu_n)} \left[ \int_0^R r J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) dr \right] J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) \exp\left[-\frac{D}{v_x} \left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2 x\right]. \quad (3.1.25)$$

Согласно [60]

$$\frac{J_1(\mu_n)}{\mu_n} = \frac{2}{R^2} \int_0^R r J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) dr,$$

тогда

$$\tilde{c}(\tau, r, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2c_H J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right)}{\mu_n J_1(\mu_n)} \exp\left[-\frac{D}{v_x} \left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2 x\right]. \quad (3.1.26)$$

Истинное значение концентрации ионов электролита:

$$\tilde{c}(\tau, r, x) = c_H - \tilde{c}(\tau, r, x) = c_H \beta, \quad (3.1.27)$$

$$\beta = 1 - \Psi, \quad (3.1.28)$$



$$\Psi = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_n r_0)}{\mu_n J_1(\mu_n)} \exp(-\mu_n^2 f_0), \quad (3.1.29)$$

где  $r_0 = \frac{r}{R}$  и  $f_0 = D \frac{x}{R^2 v_x}$  – безразмерные критерии, или

$$c(\tau, r, x) = c_H \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_0(\mu_n r_0)}{\mu_n J_1(\mu_n)} \exp[-\mu_n^2 f_0] \right\}. \quad (3.1.30)$$

Для вычисления значений функций Бесселя  $J_0(x)$  и  $J_1(x)$  использовалось разложение их в степенные ряды для значений  $x \leq 10$ . Для значений  $x \geq 10$  эти функции вычислялись с помощью асимптотических разложений. На рисунке 3.4 показано сравнение расчетных и экспериментальных значений изменения ионов коагулянта в струе латекса. Отклонение не превышает 6,7%, что свидетельствует об адекватности представленной математической модели. Средняя концентрация ионов коагулянта определялась на хроматографе «Кристалл-2000 М».

В промышленных линиях расстояние между отдельными нитями в ваннах коагуляции должно быть не меньше 8 мм, что определяется условиями ламинарного режима движения латексной струи. Увеличение скорости выдавливания до турбулентного режима приводит к радиальным пульсациям нити, которые вызывают соприкосновение нитей, их склеивание, а также отрыв от фильеры. Таким образом, ограничение на скорость выдавливания будет определяться числом Рейнольдса:

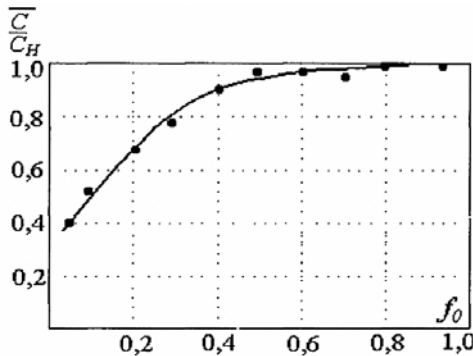


Рис. 3.4. Зависимость среднеинтегральной концентрации ионов коагулянта в струе от  $f_0$ : кривые – расчет; точки – эксперимент

$$Re = \frac{v_x d \rho}{\mu}, \quad (3.1.31)$$

где  $d$  – диаметр фильеры;  $\rho$  – плотность латексной смеси;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости латексной смеси.

Верхняя граница ламинарного режима будет зависеть от физических свойств применяемой латексной смеси и диаметра получаемой нити.

Для точного определения размера ванны коагуляции требуется знать величину коэффициента диффузии. Как показано в табл. 3.1 [75] при использовании в качестве коагулянта уксусной кислоты различной концентрации были получены следующие значения коэффициентов диффузии при температуре 20 °С.

Дальнейшее увеличение концентрации кислоты не оказывает влияние на величину коэффициента диффузии.

На рисунке 3.5 представлена графическая зависимость длины ванн коагуляции в зависимости от диаметра выдавливаемой нити и скорости выдавливания, рассчитанных на основе представленной математической модели из условия необходимости достижения средней концентрации каучука в геле, равной 0,9. Из графиков видно, что при максимальной подаче  $v = 0,2$  м/с, длина ванны коагуляции, например,  $d = 0,6$  мм, равна 1,3 м.

### 3.1. Соотношение концентрации уксусной кислоты и коэффициента диффузии

$c, \%$	10	15	20	30
$D, \text{м}^2/\text{с}$	$0,9 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$

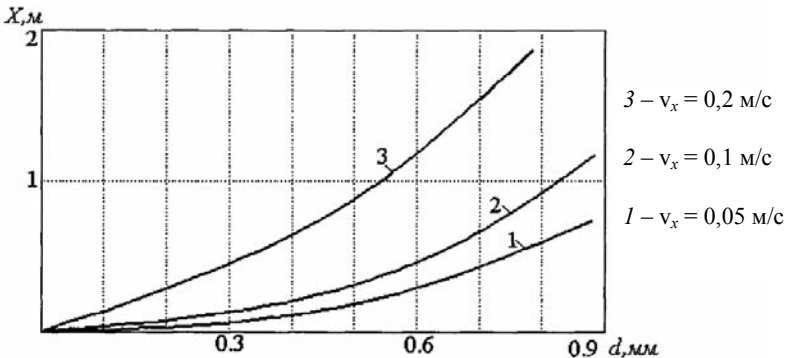


Рис. 3.5. Зависимость длины ванны коагуляции от  $v_x$  и  $R$

Нарастание слоя геля в латексной струе можно определить из уравнения (3.1.7) после подстановки в него значений величин из (3.1.25) и (3.1.30), что приводит к уравнению

$$\frac{\partial r_n}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial r_n}{\partial x} = -\frac{K}{\gamma_r} c_H \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_0\left(\frac{\mu_n r_n}{R}\right)}{\mu_n J_1(\mu_n)} \exp\left[-\frac{D}{v_x} \left(\frac{\mu_n}{R}\right)^2 x\right] \right\}, \quad (3.1.32)$$

где  $c_H$  – начальная концентрация коагулянта;  $J_0$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  $J_1$  – функция Бесселя первого рода первого порядка;  $R$  – наружный радиус струи;  $\mu_n$  – корни уравнения Бесселя;  $D$  – коэффициент диффузии коагулянта.

### 3.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СИНЕРЕЗИСА ЛАТЕКСНОГО ГЕЛЯ В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

В производстве резиновых изделий из латекса, как уже указывалось, термообработка латексных гелей является необходимой технологической операцией, которую можно разбить на два этапа. Первый этап термообработки связан с удалением влаги из геля. Это синерезис и собственно сушка. Второй этап – вулканизация изделия. При термообработке в жидкой среде термины «синерезис» и «сушка» являются адекватными, т.е. конечным результатом этих операций является уменьшение влагосодержания в геле и повышение в нем концентрации каучука.

В работах [20, 33, 45] отмечается, что формирование пленки происходит под действием капиллярного давления, возникающего за счет поверхностного натяжения на границе «жидкость–полимер» и аутогезии полимера, обусловленного взаимодиффузией его молекул. Под действием этих сил межглобулярная жидкость по капиллярам выжимается из геля, глобулы коалесцируют, концентрация каучука в геле повышается. Известно [20], что повышение температуры теплоносителя интенсифицирует процесс синерезиса.

Рассмотрим влияние капиллярных сил, внешнего давления и аутогезии на процесс удаления межглобулярной жидкости при синерезисе латексных гелей, считая, что в начальный момент глобулы каучука занимают гексагональный порядок в упаковке, как показано на рис. 3.6.

За бесконечно малый промежуток времени  $d\tau$  из объема геля удалится объем влаги, равный

$$dV = vNf d\tau, \quad (3.2.1)$$

где  $v$  – скорость движения влаги в капилляре;  $N$  – число капилляров;  $f$  – сечение капилляра.

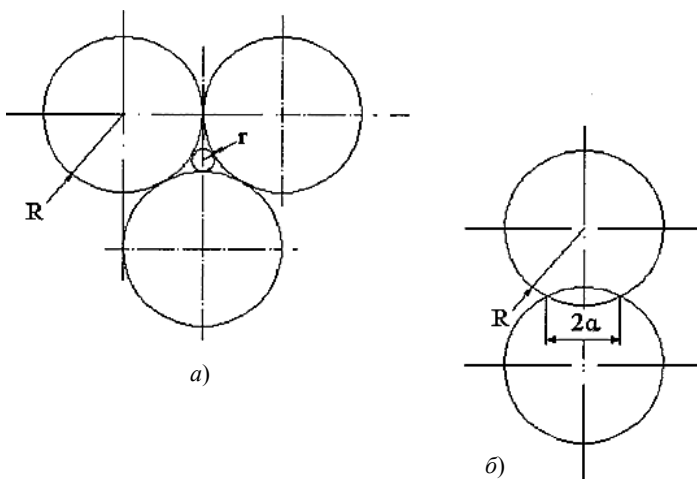


Рис. 3.6. Схема коалесценции глобул латекса

Скорость капиллярного потока [37, 61]

$$v = \frac{r^2}{8\mu} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (3.2.2)$$

где  $r$  – радиус капилляра;  $\mu$  – вязкость влаги (межглобулярной жидкости);  $\partial P/\partial x$  – градиент давления.

Капиллярное давление [46, 78, 79]

$$P_1 = \sigma(2/R + 1/R - 1/a), \quad (3.2.3)$$

где  $R$  – радиус глобул;  $\sigma$  – поверхностное натяжение на границе полимер-жидкость;  $a$  – радиус поверхности контакта глобул (рис. 3.6).

Если приложить внешнее давление к поверхности воды, в которую погружен гель, то оно будет дополнительно деформировать глобулы только при условии образования поверхности контакта глобул, т.е. при  $a > 0$ . Тогда повышение напряжения внутри глобул, воздействующего на межглобулярную жидкость, определим из соотношения

$$P_2 = P_B (a/R)^2, \quad (3.2.4)$$

где  $P_B$  – внешнее гидростатическое напряжение.

При контакте глобул друг с другом происходит взаимодиффузия молекул каучука, которая интенсифицирует коалесценцию и увеличивает давление на межглобулярную жидкость. Скорость взаимодиффузии молекул можно описать уравнением Ланжевена [44, 80]:

$$\frac{dv_M}{d\tau} + \frac{\xi}{m} v_M = F(\tau), \quad (3.2.5)$$

где  $v_M$  – скорость молекулы;  $\xi$  – коэффициент трения;  $m$  – масса молекулы;  $F(\tau)$  – флуктуирующая сила, которая при самодиффузии равна нулю.

Тогда решение уравнения (3.2.5) будет иметь вид

$$v_M = v_{0,M} e^{-\frac{\xi}{m}\tau}, \quad (3.2.6)$$

где  $v_{0,M}$  – начальная скорость молекулы.

Считаем, что повышение напряжения в глобулах за счет аутогезии пропорционально пути проникновения молекул. Тогда

$$dP_3 = c v_M d\tau = c v_{0,M} e^{-\frac{\xi}{m}\tau} d\tau. \quad (3.2.7)$$

Интегрируя (3.2.7), при условии, что  $P_3 = 0$  при  $\tau = 0$ , имеем

$$P_3 = \frac{cm v_{0,M}}{\xi} \left( 1 - e^{-\frac{\xi}{m}\tau} \right). \quad (3.2.8)$$

Градиент давления  $\partial P/\partial x$  обуславливается капиллярным давлением, внешним давлением и аутогезией. Так же считаем, что число капилляров на поверхности пленки равно

$$N = \frac{S}{\pi R^2},$$

где  $S$  – наружная поверхность пленки.

Перепад давления в пленке

$$\Delta P = P_1 + P_2 + P_3.$$

В процессе деформации глобул происходит изменение площади контакта глобул и радиуса капилляров. Связь величин  $a$  и  $r$  с временем можно представить в виде зависимостей [11]:

$$a = \frac{R}{2} - br, \quad (3.2.9)$$

$$r = r_0 e^{-\tau/k}, \quad (3.2.10)$$

где  $k$  – константа;  $r_0 = 0,155$  [44];  $b = 3,22$ .

Из уравнений (3.2.9) и (3.2.10) получим

$$a = 0,5R(1 - e^{-\tau/k}). \quad (3.2.11)$$

Подставим в (3.2.1) все значения величин

$$dV = -\frac{r^4 S}{8\mu x_0 R^2} \left[ \sigma \left( \frac{2}{R} + \frac{1}{R} - \frac{1}{a} \right) + P_b \left( \frac{a}{R} \right)^2 + \frac{cmv_{0,M}}{\xi} \left( 1 - e^{-\frac{\xi}{m}\tau} \right) \right] d\tau. \quad (3.2.12)$$

Интегрирование уравнения (3.2.12) приводит к зависимости

$$B = S \left\{ \frac{ak}{3} (1 - e^{-3\tau/k}) + bk \left[ \frac{1}{3} (1 - e^{-3\tau/k}) + \frac{1}{2} (1 - e^{-3\tau/k}) + 1 - e^{-3\tau/k} - \ln(1 - e^{\tau/k}) \right] + \frac{k}{4} (b' + d) (1 - e^{-4\tau/k}) + kAP_b 0,25 \left[ \frac{1}{4} (1 - e^{-4\tau/k}) \right] - \frac{2}{5} (1 - e^{-5\tau/k}) + \frac{1}{6} (1 - e^{6\tau/k}) - \frac{d}{\left( \frac{4}{k} + \frac{\xi}{m} \right)} \left[ 1 - e^{-\left( \frac{4}{k} + \frac{\xi}{m} \right)\tau} \right] \right\}, \quad (3.2.13)$$

$$\text{где } a' = \frac{A\sigma}{0,155R}, \quad A = \frac{r^4}{8\mu x_0 R^2}, \quad b' = \frac{A\sigma}{0,55R}, \quad d = \frac{Acmv_{0,M}}{\xi}.$$

С другой стороны, этот объем удаляемой из геля жидкости можно определить и по формуле

$$B = S(x_0 - x), \quad (3.2.14)$$

где  $x$  – текущее значение толщины пленки геля.

Из уравнений (3.2.13) и (3.2.14) получаем выражение для определения текущего значения толщины пленки

$$x = x_0 - B, \quad (3.2.15)$$

$$B = \left\{ \frac{a'k}{3} (1 - e^{-3\tau/k}) + b'k \left[ \frac{1}{3} (1 - e^{-3\tau/k}) + \frac{1}{2} (1 - e^{-3\tau/k}) + 1 - e^{-3\tau/k} - \ln(1 - e^{\tau/k}) \right] + \frac{k}{4} (b' + d) (1 - e^{-4\tau/k}) + kAP_b 0,25 \left[ \frac{1}{4} (1 - e^{-4\tau/k}) \right] - \frac{2}{5} (1 - e^{-5\tau/k}) + \frac{1}{6} (1 - e^{6\tau/k}) - \frac{d}{\left( \frac{4}{k} + \frac{\xi}{m} \right)} \left[ 1 - e^{-\left( \frac{4}{k} + \frac{\xi}{m} \right)\tau} \right] \right\}. \quad (3.2.16)$$

Тогда изменение концентрации каучука в пленке геля

$$c = \frac{c_0 x_0}{x_0 - B}, \quad (3.2.17)$$

где  $c_0$  – начальная концентрация каучука в геле.

Таким образом, уравнение (3.2.17) позволяет рассчитать концентрацию каучука в геле при водном синерезисе, в зависимости от времени, поверхностного натяжения и приложенного давления. На рисунке 3.7 приведены графические зависимости, полученные на основе расчетов по уравнению (3.2.17). Как показывает анализ этих зависимостей, они удовлетворительно описывают результаты экспериментальных исследований [20] при отсутствии внешнего давления. Влияние внешнего давления на изменение текущей концентрации сказывается лишь при значениях  $P_b > 10^8$  Па [80].

Как было сказано выше, увеличение температуры воды ускоряет синерезис латексных гелей. Это ускорение может быть связано с ростом скорости взаимодиффузии молекул при повышении температуры.

Скорость взаимодиффузии может быть описана уравнением [80]

$$v_{0,м} = v_{\infty} e^{-\frac{u}{R_r(T-T_0)}}, \quad (3.2.18)$$

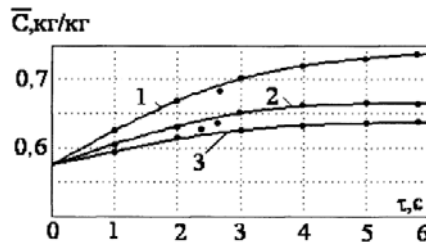
где  $u$  – энергия активации молекул каучука;  $R_r$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура синерезиса;  $v_{\infty}$  – максимальная скорость взаимодиффузии;  $T_0$  – начальная температура.

С учетом (3.2.18) уравнение (3.2.17) будет иметь вид

$$c = \frac{c_0 x_0}{x_0 - \left\{ \frac{a'k}{3} (1 - e^{-3\tau/k}) + b'k[\bullet] + \frac{k}{4} \left[ b' + c'e - \frac{u}{R_r(T-T_0)} \right] (1 - e^{-4\tau/k}) \right\}}, \quad (3.2.19)$$

где  $[\bullet]$  – второй член уравнения (3.2.13) в фигурных скобках;  $c$  – константа.

**Рис. 3.7. Изменение средней концентрации каучука при синерезисе геля с диаметром нити  $d = 0,6$  мм при различной температуре: 1 –  $t = 110$  °С; 2 –  $t = 100$  °С; 3 –  $t = 80$  °С; кривая – расчет; точки – эксперимент**



Уравнение (3.2.19) связывает все технологические параметры проведения водного синерезиса латексных гелей. Константы  $K = 12$  и  $c = 2,0 \cdot 10^{-6}$ , которые найдены при обработке экспериментальных данных по кинетике изменения среднего влагосодержания для нитей с диаметром от 0,3...0,9 мм в диапазоне температур глицерина 80...110 °С.

На рисунке 3.7 показано сравнение расчетных и экспериментальных кривых изменения средних концентраций каучука в геле при диаметре нити 0,6 мм. Отклонение в 6,9% свидетельствует об адекватности представленной математической модели синерезиса латексного геля в жидком теплоносителе – глицерине.

### 3.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗДУШНО-ТЕПЛОВОЙ СУШКИ РЕЗИНОВЫХ НИТЕЙ

Как уже указывалось в предыдущей главе, после термообработки латексного геля в жидком теплоносителе влага остается в самих глобулах каучука и ее удаление целесообразно проводить в среде нагретого воздуха. Движущей силой в этом случае является разность давлений пара (или разность концентраций пара у поверхности изделия и в омываемом изделие газовом потоке).

Для оптимального проектирования сушилок необходимо знать распределение температур и влагосодержания в изделии в зависимости от времени сушки и технологических параметров ее проведения.

Для описания взаимосвязанного тепло- и массопереноса при сушке латексных нитей используем уравнения [41, 81]:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + v_x \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\varepsilon \lambda}{r'} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\varepsilon c}{r'} v_x \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (3.3.1)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \left( a - \frac{\varepsilon^2 \lambda}{\rho c} \right) \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \frac{\varepsilon r'}{c} \left[ -a_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + v_x \frac{\partial u}{\partial x} \right] - \frac{\partial t}{\partial x} (1 + \varepsilon^2) v_x. \quad (3.3.2)$$

Введем обозначения:

$$d = \left( a - \frac{\varepsilon^2 \lambda}{\rho c} \right), \quad W = v_x (1 + \varepsilon^2),$$

$$f_1(r, x, \tau) = \frac{\varepsilon r'}{c} = \left[ a_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + v_x \frac{\partial u}{\partial x} \right];$$

$$f_2(r, x, \tau) = \left[ -\frac{\varepsilon \lambda}{r'} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\varepsilon c}{r'} v_x \frac{\partial t}{\partial x} \right].$$



Тогда полученную систему уравнений можно переписать в виде

$$\frac{\partial t}{\partial x} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) - W \frac{\partial t}{\partial x} - f_1(r, x, \tau); \quad (3.3.3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + v_x \frac{\partial u}{\partial x} + f_2(r, x, \tau). \quad (3.3.4)$$

Уравнения (3.3.3) и (3.3.4) представляют собой математическую модель связанного теплообмена при сушке латексных нитей. Значения коэффициентов уравнений (3.3.3) и (3.3.4) использовались из результатов работы [46]:

$$\begin{aligned} a &= a_0 + \alpha t, & a_0 &= 3,395 \text{ м}^2/\text{с}, & \alpha &= -0,11 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}^2, \\ \lambda &= \lambda_0 + \beta t, & \lambda_0 &= 0,654 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}, & \beta &= -0,152 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}\cdot\text{К}^2, \\ c &= c_0 + \gamma t, & c_0 &= 1076 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}, & \gamma &= 2,374 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}^2. \end{aligned}$$

Коэффициент  $a_m$  [44] определяем из уравнения

$$a_m = 0,76 \cdot 10^{-11} \exp[(0,0335 + 0,046u)(T - 50) + 11,5u],$$

где  $T$  – температура теплоносителя, °С.

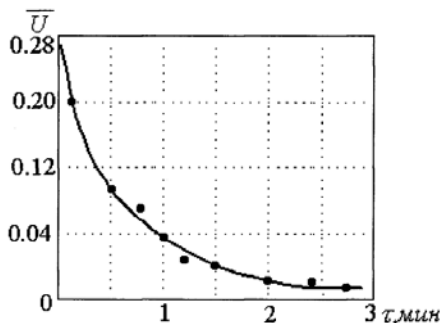
Остальные значения параметров:

$$\begin{aligned} v_x &= 0,2 \text{ м/с}, \\ \rho &= 1000 \text{ кг/м}^3, \\ r &= 2,52 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}. \end{aligned}$$

Решение системы уравнений проводилось численным способом на ЭВМ с использованием метода прогонки [63].

На рисунке 3.8 приведено сравнение расчетных и экспериментальных кривых изменения среднего влагосодержания при сушке нити диаметром 0,6 мм при температуре 120 °С. Отклонение экспериментальных данных от теоретических не превышает 9,6%, что свидетельствует об адекватности используемой математической модели. В процессе исследований установлено, что инерционность развития полей влагосодержания в нити существенно выше, чем полей температуры, поэтому в дальнейших расчетах предложено использовать только уравнение массопереноса:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + v_x \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (3.3.5)$$



**Рис. 3.8.** Зависимость среднего влагосодержания в латексной нити  $d = 0,6$  мм от времени сушки при  $t = 120$  °С:  
кривая – расчет; точки – эксперимент

с краевыми условиями:

$$u(r, 0) = f(r);$$

$$-a_m \frac{\partial u}{\partial R}(R, \tau) = \varphi(\tau);$$

$$0 \leq r \leq R, \quad r > 0.$$

Функция  $f(r)$  начального распределения концентрации определяется расчетом на предыдущей технологической операции. Плотность потока массы с поверхности резиновой нити  $\varphi(\tau)$  определена экспериментально при различных значениях среднеинтегральной влажности нити и температуры среды. Эта характеристика изменяется в процессе перемещения нити по сушилке и учитывается при реализации численного алгоритма расчета.

### Выводы по главе 3

1. Предложено математическое описание процесса нитеобразования в ванне коагуляции в виде дифференциального уравнения в частных производных второго порядка. Представлено аналитическое решение этого уравнения.

2. Разработана математическая модель процесса синерезиса латексного геля в жидком теплоносителе.

3. Предложено математическое описание процесса воздушно-тепловой сушки латексных нитей.

4. Отклонение расчетных и экспериментальных данных не превышает 7...10%, что свидетельствует об адекватности используемых математических моделей.

## 4. АППАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЛАТЕКСНЫХ НИТЕЙ

---

За основу принимаем процесс получения резиновых нитей из латекса, рассмотренный в п. 2.2, включающий следующие технологические операции:

- а) коагуляцию;
- б) синерезис в жидком теплоносителе-глицерине;
- в) промывку в воде;
- г) сушку и вулканизацию.

### 4.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

Как известно [26, 29, 30, 31, 33, 66] методы оптимизации можно применять лишь при наличии математического описания (математической модели) оптимизируемого объекта.

Задача оптимизации может ставиться на различных этапах осуществления технологического процесса, как при проектировании необходимого оборудования, так и работающего на производстве. Во втором случае это задача оптимального управления. В настоящее время проблемным вопросом является уменьшение длины линии изготовления латексных нитей, что ведет к сокращению производственных площадей и уменьшению металлоемкости. Поэтому рассмотрим вопрос оптимального проектирования.

Для этого необходимо выбрать критерий оптимальности, которым в рассматриваемом варианте является длина линии  $L_{\text{опт}}$ .

Задача оптимизации формируется следующим образом: для заданного диаметра резиновой нити требуется определить минимальные размеры технологической линии  $L_{\text{опт}}$  при связях в форме уравнений математической модели (3.1.27), (3.2.18), (3.3.3) и (3.3.4) и ограничениях: скорость движения нити  $v = v_{\text{max}}$ , температура синерезиса  $t_{\text{син}} \leq t_{\text{доп}}$ , температура сушки  $t_{\text{суш}} \leq t_{\text{доп}}$ , время промывки в воде  $t_{\text{пр}} \leq 2$  с, влагосодержание после сушки  $u_{\text{кон}} \leq u_{\text{доп}}$ .

Проведем декомпозицию поставленной задачи оптимизации на ряд подзадач: оптимального проектирования размеров ванн коагуляции, синерезиса в жидком теплоносителе, промывки в воде и термической обработки в воздушно-тепловой сушилке.

Считаем, что общий критерий оптимальности  $L_{\text{опт}}$  складывается из суммы оптимальных (минимально возможных) размеров оборудования для обозначенных выше последовательных технологических операций:

$$L_{\text{опт}} = \sum_{i=1}^n L_{i, \text{опт}}, \quad n = 4,$$

учитывая, что в ваннах коагуляции, синерезиса и промывки показатели состояния объекта достигают своих экстремальных значений, а интенсивность удаления влаги в глицерине существенно выше, чем при воздушно-тепловой сушке. Рассчитаем значения  $L_{i, \text{опт}}$  в каждой технологической операции производства резиновых нитей.

## 4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ВАННЫ КОАГУЛЯЦИИ

При проведении процесса коагуляции необходимо полное формирование нити из латекса в виде геля. Это происходит при значениях концентрации коагулянта  $c > 0,9$ . Математическая модель процесса коагуляции рассмотрена в п. 3.1. Результаты расчета минимально возможных размеров ванн коагуляции до момента достижения  $c > 0,9$  для различной скорости подачи геля и диаметра нити показаны на рис. 3.5.

Согласно расчету, например, при диаметре нити  $d = 0,6$  мм и максимальной скорости  $u = 0,2$  м/с длина ванны равна  $L_{i, \text{опт}} = 1,3$  м (см. рис. 3.5).

## 4.3. РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ВАНН ДЛЯ СИНЕРЕЗИСА ЛАТЕКСНЫХ ГЕЛЕЙ В ГЛИЦЕРИНЕ

При проведении процесса синерезиса в глицерине оптимальным считается достижение равновесных значений концентрации каучука в геле с точностью  $\pm 5\%$  при ограничениях на температуру среды, вызванных явлениями, ухудшающими качество готовых изделий.

Математическая модель процесса синерезиса представлена в п. 3.2. При расчетах длительности процесса в зависимости от диаметра нити эти значения составляют единицы секунд, что свидетельствует о значительной интенсивности процесса удаления влаги, чем при воздушно-тепловой сушке. Процесс синерезиса целесообразно вести на уровне ограничения температуры, т.е. при  $t = 110$  °С, что приводит к более высоким показателям средней концентрации каучука в геле.

Из данных, представленных на рис. 3.7, следует, что, например, при диаметре нити  $d = 0,6$  мм длительность процесса синерезиса составляет  $\tau_c = 5,5$  с, при этом достигается средняя концентрация каучука  $\bar{c} = 72,8\%$ . Таким образом, для обеспечения максимальной производительности линии при  $v_{\text{max}} = 0,2$  м/с длина ванны синерезиса составляет

$$L_{2 \text{ опт}} = v_{\text{max}} \cdot \tau_{\text{син}} = 0,2 \cdot 5,5 \approx 1,1 \text{ м.}$$

#### 4.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ВАНН ПРОМЫВКИ

Экспериментальные исследования, представленные в п. 3.3, показали, что для удаления глицерина с поверхности резиновой нити достаточно двух секунд нахождения в ванне с водой вне зависимости от диаметра исследуемых нитей. Контрольная проверка нитей на наличие на ее поверхности следов глицерина после промывки с помощью фильтровальной бумаги показала полное их отсутствие. Оптимальная длина ванны промывки в воде при максимальной производительности линии составляет

$$L_{3\text{опт}} = v_{\text{max}} \cdot \tau_{\text{пром}} = 0,2 \cdot 2 = 0,4 \text{ м.}$$

#### 4.5. РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ КАМЕРЫ СУШКИ

Совмещение процессов синерезиса и сушки значительно сократит длительность последнего. Расчеты по уравнениям (3.3.3), (3.3.4) математической модели, представленной в п. 3.3, при условии ведения процесса на максимально возможном уровне температуры  $t = 120 \text{ }^\circ\text{C}$  и необходимости достижения конечного среднего влагосодержания  $u_{\text{кон}}$  позволяют определить необходимое время сушки и длину камеры сушки. Например, для нити диаметром  $d = 0,6 \text{ мм}$  при конечном влагосодержании  $u_{\text{кон}} = 1,7\%$  длительность сушки составляет  $\tau_{\text{суш}} = 165 \text{ с}$  (рис. 3.8, п. 3.3). Таким образом, для данного диаметра нити необходимая длина камеры сушки составляет

$$L_{4\text{опт}} = v_{\text{max}} \cdot \tau_{\text{суш}} = 0,2 \cdot 165 = 33 \text{ м.}$$

#### 4.6. СРАВНЕНИЕ БАЗОВОГО ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА С ПРЕДЛАГАЕМЫМ

Оптимальная длина предлагаемого варианта технологического процесса с синерезисом геля в глицерине без учета расстояния между ваннами и сушилкой составляет

$$L_{\text{опт}} = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 ;$$

$$L_{\text{опт}} = 1,3 + 1,1 + 0,4 + 33 = 35,8 \text{ м.}$$

Эксплуатируемая линия имеет следующие размеры.

Длина ванны коагуляции  $L_1 = 2,7 \text{ м}$ , длина двух ванн промывки  $L_2 = 3,0 \text{ м}$ , камеры сушки-вулканизации  $L_3 = 50 \text{ м}$ . Общая длина линии  $L_0 = 55,7 \text{ м}$ . Следовательно, уменьшение проектируемой линии по сравнению с эксплуатируемой составляет более 30%.

#### **Выводы по главе 4**

1. Сформулирована задача оптимизации линии изготовления латексных нитей на стадии проектирования.
2. Изложен алгоритм решения задачи оптимизации.
3. Приведен пример расчета оптимальной длины линии изготовления латексной нити диаметром  $d = 0,6$  мм по предложенной технологии с использованием синерезиса геля в глицерине. При этом длина проектируемой линии по сравнению с эксплуатационной уменьшается более чем на 30%, а получаемые нити имеют более высокое качество.

## 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

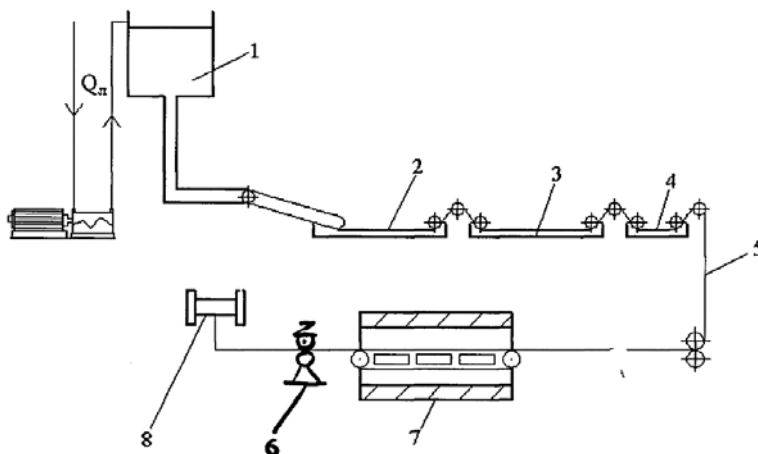
Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили спроектировать линию для производства резиновых нитей из латекса диаметром до 0,6 мм, включающую в себя, помимо рассчитанного оборудования, систему дозирования и оборудование для получения лент из нитей, показанную на рис. 5.1.

В данной главе рассмотрены также вопросы отложения латексного геля в подводящей системе трубопроводов, эксплуатационной надежности разработанной линии и расчет оптимальной численности обслуживающего персонала.

### 5.1. СИСТЕМА ДОЗИРОВАНИЯ ЛАТЕКСА

При изготовлении резиновых нитей из латекса традиционным методом выдавливания его в ванну с коагулянтom используется система дозирования (рис. 5.1), включающая в себя бачок с латексной смесью, емкости, регулировочный клапан, механизмы весов и подъема емкостей. Эта система довольно сложна и требует повышенного внимания.

Предлагаемая система управления работой дозатора использует только гидродинамику потоков и состоит из емкости для латексной смеси и насоса, который ее в них подает.



**Рис. 5.1. Технологическая схема разработанной линии для изготовления резиновых нитей из латекса:**

1 – бачок с латексной смесью; 2 – ванна с кислотой; 3 – ванна с глицерином; 4 – ванна с водой; 5 – латексная нить; 6 – каландр; 7 – сушилка; 8 – намотка

Объемная производительность линии изготовления резиновых нитей из латекса при нормальной работоспособности коллектора с фильерами будет определяться равенством

$$Q = nvf, \quad (5.1.1)$$

где  $n$  – число фильер;  $v$  – скорость вытекающей из фильеры струи латексной смеси;  $f$  – сечение фильеры.

Скорость вытекающей из фильеры струи определим уравнением [59]

$$v = \mu \sqrt{2gH}, \quad (5.1.2)$$

где  $H$  – напор;  $g$  – ускорение свободного падения тел;  $\mu$  – коэффициент расхода.

Подставим (5.1.2) в (5.1.1)

$$Q = \mu fn \sqrt{2gH}. \quad (5.1.3)$$

При работе линии латексная смесь из емкости расходуется через фильеры, а в емкость подается насосом. Изменение напора описывается уравнением [65]

$$\frac{dH}{d\tau} = \frac{1}{F}(Q_n - Q), \quad (5.1.4)$$

где  $\tau$  – время;  $F$  – сечение емкости;  $Q_n$  – подача насоса.

Подставим в (5.1.4) значение  $Q$  из (5.1.3)

$$\frac{dH}{d\tau} = \frac{1}{F}Q_n - \frac{\mu fn}{F}\sqrt{2gH}. \quad (5.1.5)$$

Введем обозначения

$$\frac{1}{F} = K, \quad \mu fn \sqrt{2g} = b.$$

Тогда (5.1.5) запишется в виде

$$\frac{dH}{d\tau} = KQ_n - Kbn\sqrt{H}$$

или

$$\frac{dH}{d\tau} + KbnH^{1/2} = KQ_n. \quad (5.1.6)$$



Выражение (5.1.6) является линейным неоднородным дифференциальным уравнением. Чтобы его решить, сначала выделим однородное уравнение

$$\frac{dH}{d\tau} + KbnH^{1/2} = 0. \quad (5.1.7)$$

Разделим переменные

$$H^{-1/2}dH = -Kbn d\tau.$$

После интегрирования получим

$$H^{1/2} = -\frac{Kbn}{2}\tau + c. \quad (5.1.8)$$

Считая  $c$  функцией от  $\tau$ , подберем ее так, чтобы уравнение (5.1.8) удовлетворяло (5.1.6). Для этого продифференцируем (5.1.8):

$$\frac{1}{2}H^{-1/2} \frac{dH}{d\tau} = -\frac{Kbn}{2}\tau + \frac{dc}{d\tau}$$

или

$$\frac{dH}{d\tau} = 2H^{1/2} \left( -\frac{Kbn}{2} + \frac{dc}{d\tau} \right). \quad (5.1.9)$$

Подставим (5.1.9) в (5.1.6) и получим

$$2H^{1/2} \left( -\frac{Kbn}{2} + \frac{dc}{d\tau} \right) + KbnH^{1/2} = KQ_n.$$

Разделим на  $2H^{1/2}$

$$\begin{aligned} -\frac{Kbn}{2} + \frac{dc}{d\tau} + \frac{Kbn}{2} &= \frac{1}{2}KH^{1/2}Q_n; \\ \frac{dc}{d\tau} &= \frac{1}{2}KH^{-1/2}Q_n. \end{aligned} \quad (5.1.10)$$

После интегрирования (5.1.10) имеем

$$c = \frac{K}{2}H^{-1/2}Q_n\tau + A, \quad (5.1.11)$$

где  $A$  – произвольная постоянная.

Для ее определения из (5.1.11) значение  $c$  в (5.1.8)

$$H^{1/2} = -\frac{Kbn}{2}\tau + \frac{K}{2}H^{-1/2}Q_H\tau + A.$$

При  $\tau = 0, H = H_0$ . Тогда  $A = H_0^{1/2}$ .

$$H^{1/2} = -\frac{Kbn}{2}\tau + \frac{K}{2}H^{-1/2}Q_H\tau + H_0. \quad (5.1.12)$$

Умножим (5.1.12) на  $H^{1/2}$  и сделаем преобразования

$$H - H^{1/2}\left(H_0^{1/2} - \frac{Kbn}{2}\tau\right) - \frac{K}{2}H^{-1/2}\tau = 0.$$

Произведем замену

$$H^{1/2} = z, \quad H = z^2, \quad \left(H_0^{1/2} - \frac{Kbn}{2}\tau\right) = M, \quad \frac{K}{2}Q_H\tau = N.$$

Тогда имеем уравнение

$$z^2 - zM - N = 0. \quad (5.1.13)$$

Решением уравнения (5.1.13) будет

$$z_{1,2} = \frac{M \pm \sqrt{M^2 + 4N}}{2}.$$

Действительным будут положительные корни.

Окончательно имеем

$$H^{1/2} = \frac{\left(H_0^{1/2} - \frac{Kbn}{2}\tau\right) \pm \sqrt{\left(H_0^{1/2} - \frac{Kbn}{2}\tau\right)^2 + 2KQ_H\tau}}{2}. \quad (5.1.14)$$

Уравнение (5.1.14) описывает изменение уровня в емкости при работе коллектора фильтр.

Время паузы  $\tau_H$  в работе насоса определим из условий истечения латексной смеси при переменном напоре. За бесконечно малый промежуток времени  $d\tau$  через фильтры вытекает объем латексной смеси

$$dq = \nu n d\tau = \mu\sqrt{2gh}fn - d\tau = bnH^{1/2}d\tau \quad (5.1.15)$$

и уровень в емкости упадет на величину  $dH$ , а объем

$$dq = -FdH. \quad (5.1.16)$$

Из равенств (5.1.15) и (5.1.16)

$$d\tau = -\frac{F}{bn} \frac{dH}{H^{1/2}}.$$

Проинтегрируем (5.1.17) в пределах изменения напора от  $H$  до  $H_0$ :

$$\tau_{\Pi} = -\frac{F}{bn} \int_H^{H_0} H^{1/2} dH = \frac{2F}{bn} (H^{1/2} - H_0^{1/2}). \quad (5.1.17)$$

Используя уравнения (5.1.14) и (5.1.17) при заданных конструктивных и технологических параметрах, можно рассчитать циклограмму работы насоса. Заложённая в память микропроцессора, она будет выполнять роль автоматического управления работой дозатора в линии изготовления резиновых нитей из латекса. Для перекачивания латекса наиболее целесообразным является использование одновинтовых насосов небольших подач. При этом намного облегчается разборка и чистка такого насоса от отложившегося геля на его внутренней поверхности. На рисунке 5.2 представлены циклограммы для различных  $Q_{\Pi}$  и диаметра фильеры  $d = 1,2$  мм на основе данных, приведенных ниже.

Расход латексной смеси при работе  $n = 300$  фильер при максимальном диаметре  $d = 1,2 \cdot 10^{-3}$  м и скорости  $v = 0,2$  м/с:

$$Q_{\Pi} = \frac{\pi d^2}{4} 300v = \frac{3,14 \cdot (1,2 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 300 \cdot 0,2 = 0,57 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

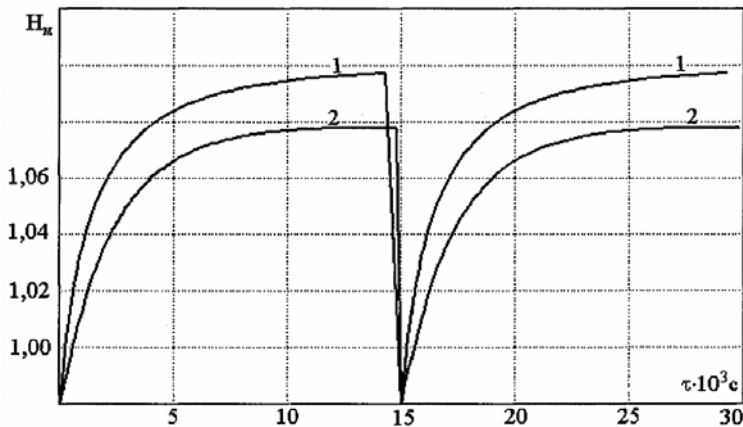


Рис. 5.2. Циклограмма работы насоса дозатора:

1 —  $Q_{\Pi} = 0,74 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ; 2 —  $Q_{\Pi} = 0,63 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

Объем бака латексной смеси для часовой непрерывной работы

$$V_{\text{л}} = Q_{\text{л}} \tau = 0,57 \cdot 10^{-4} \cdot 3600 = 0,2 \text{ м}^3.$$

Обычно бак выполняется в виде цилиндрической емкости, которую можно оптимизировать по критерию минимальной поверхности [12]. В этом случае диаметр бака  $D$  и его высота  $h$  определяются соотношением:

$$D = h = 2\sqrt[3]{\frac{V_{\text{л}}}{2\pi}} = 2\sqrt[3]{\frac{0,2}{2 \cdot 3,14}} = 0,64 \text{ м}.$$

Поддача насоса должна быть больше расхода латексной смеси  $Q_{\text{н}} > Q_{\text{л}}$ .

$$Q_{\text{н}} = (1,1 \div 1,3) Q_{\text{л}} = (1,1 \div 1,3) \cdot 0,57 \cdot 10^{-4} = 0,63 \cdot 10^{-4} \cdot 0,74 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Сечение бака

$$F = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,64^2}{4} = 0,32 \text{ м}^2;$$

$$b = \mu f \sqrt{2g} = 0,05 \cdot 4,52 \cdot 10^{-6} \sqrt{2 \cdot 9,81} = 1 \cdot 10^{-6},$$

где

$$f = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (1,2 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 4,52 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$\frac{Kbn}{2} = \frac{3,14 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 300}{2} = 4,68 \cdot 10^{-4},$$

где  $K = \frac{1}{F} = \frac{1}{0,32} = 3,12 \text{ м}^{-2}$ ,  $H_0 = 1 \text{ м}$ .

Время паузы в работе насоса

– при  $Q_{\text{н}} = 0,74 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

$$\tau_{n,1} = \frac{2F}{bn} (\sqrt{H} - \sqrt{H_0}) = \frac{2 \cdot 0,32}{1 \cdot 10^{-6} \cdot 300} (\sqrt{1,06} - \sqrt{1}) = 53 \text{ с};$$

– при  $Q_{\text{н}} = 0,63 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

$$\tau_{n,2} = \frac{2F}{bn} (\sqrt{H} - \sqrt{H_0}) = \frac{2 \cdot 0,32}{1 \cdot 10^{-6} \cdot 300} (\sqrt{1,042} - \sqrt{1}) = 44 \text{ с}.$$

## 5.2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛЕНТ ИЗ НИТЕЙ

В настоящее время для изготовления различных вязаных и тканых материалов широко применяют резиновые латексные нити круглого сечения, которые придают им высокую эластичность, улучшая потребительские свойства. Латексные нити поставляются в катушках и в виде ленты, составленной из 40 шт. отдельных нитей. При использовании ленты большое значение имеет сила адгезии между отдельными нитями в ленте, так как она определяет технологичность процесса изготовления конкретного изделия. Малая сила адгезии ведет к расслоению ленты, а большая – к сбоям в работе текстильных машин.

Для формирования резиновых лент из латексных нитей применяют машину образования лент (рис. 5.3), которая представляет собой два вала, между которыми пропускаются нити. При сдавливании нитей происходит прижатие их друг к другу и слипание в ленту за счет сил адгезии. Интерес представляют теоретический и практический вопросы определения влияния параметров рабочих органов машины на силу адгезии между нитями в ленте.

Считаем, что сила адгезии между нитями в ленте зависит от напряжения и поверхности контакта нитей при их сдавливании валками. Тогда можно записать

$$\rho = \varphi \sigma F, \quad (5.2.1)$$

где  $\varphi$  – коэффициент, зависящий от состояния поверхности нитей;  $\sigma$  – среднее значение напряжения в нити;  $F$  – поверхность контакта.

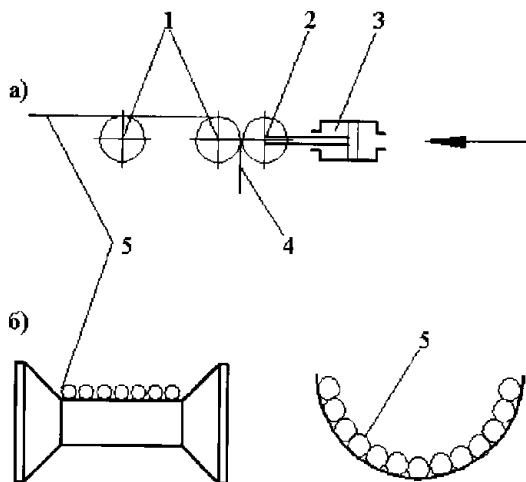
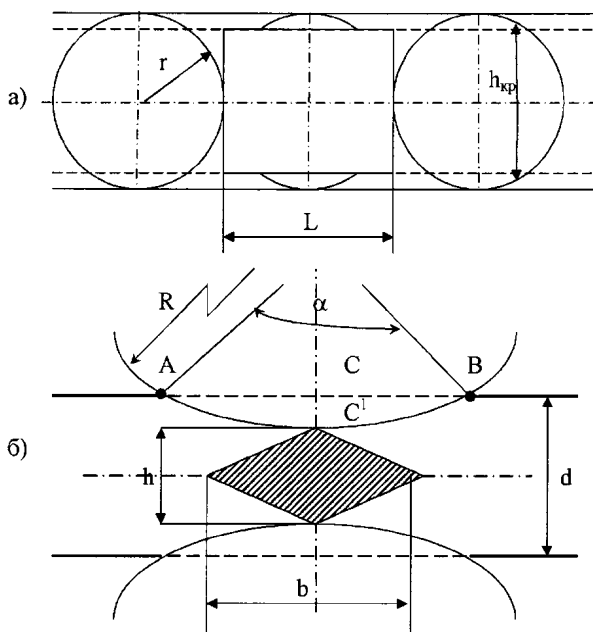


Рис. 5.3. Машина образования лент



**Рис. 5.4. Схема деформации резиновых нитей:**  
 $a$  – в поперечном сечении;  $b$  – в продольном сечении

Рассмотрим схему деформации нитей при их сдавливании валками машины рис. 5.4. Первоначально, когда зазор между валками равен  $h = 2r$ , нити укладываются без деформации, и поверхность контакта между ними представляет линию. При уменьшении зазора  $h$  они начинают деформироваться. Сверху и снизу нить сжимается, а с боков растягивается, заполняя свободный промежуток. Таким образом, имеет место деформация сжатия и растяжения. Средние значения напряжений сжатия и растяжения можно принять одинаковыми и в дальнейшем говорить просто о напряжении в нитях. Заполнение свободных промежутков при деформировании будет происходить до тех пор, пока зазор не достигнет некоторой критической величины  $h_{кр}$ , соответствующий полному контакту нитей в показанном сечении. Критический зазор можно определить из условия равенства сечений до и после сжатия:

$$f_0 = f, \quad (5.2.2)$$

где  $f_0 = \pi r^2$  – сечение нити до сжатия;  $f = 2rh_{кр}$  – сечение нити после сжатия.

Из (5.2.2) получаем, что

$$h_{\text{кр}} = 1,57r .$$

На рисунке 5.4, б показана схема деформации по длине нити. Заштрихованная площадка является поверхностью контакта нитей между собой. Величину этой поверхности определим из геометрии представленной схемы. Отрезки

$$AC = \sqrt{\left(r - \frac{h}{2}\right) \left[2R - \left(r - \frac{h}{2}\right)\right]}, \quad CC' = r - \frac{h}{2} .$$

Длина поверхности контакта

$$b = 2AC . \quad (5.2.3)$$

Максимальная величина в соответствии  $h = 0$

$$b_{\text{max}} = 2\sqrt{r(2R - r)} ; \quad (5.2.4)$$

Поверхность контакта

$$F = \frac{h}{2} \sqrt{\left(r - \frac{h}{2}\right) \left[2R - \left(r - \frac{h}{2}\right)\right]} . \quad (5.2.5)$$

Определим деформацию и напряжение в нитях. Уменьшение объема при деформации

$$\Delta V = 2f_c L , \quad (5.2.6)$$

где  $f_c$  – площадь сегмента  $ABC'$ ;  $L$  – длина хорды сегмента.

Длина  $L$  определяется из соотношений

$$\begin{cases} L = 2k' \sqrt{r^2 - \frac{h^2}{4}}, & h > h_{\text{кр}}; \\ L = 2r, & h \leq h_{\text{кр}}, \end{cases} \quad (5.2.7)$$

где  $k'$  – коэффициент коррекции. Он вводится потому, что при сжатии нити длина  $L$  сегмента будет всегда больше значения длины хорды из-за заполнения свободного промежутка между сечениями нитей

$$2r = k' 2 \sqrt{r^2 - \frac{h^2}{4}} .$$

Его значение определим из условия равенства длины сегмента и хорды, когда  $L = 2r$  и  $h = 1,57r$ , откуда

$$k' = \frac{r}{\sqrt{r^2 - \frac{(1,57r)^2}{4}}} \approx 1,6.$$

Площадь сегмента

$$f_c = \frac{1}{2}[Rl + \text{вс}']. \quad (5.2.8)$$

Длина дуги сегмента

$$l = 1,745 \cdot 10^{-2} R\alpha,$$

тогда

$$f_c = \frac{1}{2} \left\{ R^2 \arcsin \frac{1}{R} \sqrt{\left(r - \frac{h}{2}\right) \left[2R - \left(r - \frac{h}{2}\right)\right]} \right\}, \quad (5.2.9)$$

$\alpha$  – угол сегмента.

Деформация при сжатии

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{f_c L}{\pi r^2 \sqrt{r(2R-r)}}. \quad (5.2.10)$$

Так как объем образца нити до сжатия

$$V_0 = 2\pi r^2 \sqrt{r(2R-r)}.$$

Напряжение в нити [65]

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{или} \quad \sigma = a\varepsilon^{k+1}, \quad (5.2.11)$$

где  $E = a\varepsilon^k$  – модуль упругости материала нити;  $a, k$  – константы.

Подставим в (5.2.11) значение  $\varepsilon$  из (5.2.10):

$$\sigma = a \left[ \frac{f_c L}{\pi r^2 \sqrt{r(2R-r)}} \right]^{k+1}. \quad (5.2.12)$$

Силу адгезии между нитями определим из (5.2.1), подставив в него все значения величин:

$$\rho = \frac{k''h}{2} \sqrt{\left(r - \frac{h}{2}\right) \left[2R - \left(r - \frac{h}{2}\right)\right]} \left[ \frac{f_c L}{\pi r^2 \sqrt{r(2R-r)}} \right]^{k+1},$$

где  $k'' = a\varphi$ .



Были проведены эксперименты по образованию ленты из нитей. Использовались свулканизированные нити диаметром  $d = 0,6$  мм в количестве 40 шт. в ленте. Перед поступлением их в каландр они собирались на нитесборнике (рис. 5.4, б) для обеспечения соприкосновения между собой. Диаметр валков каландра  $D = 100$  мм. Величина зазора между валками была выбрана из следующих значений:

$$h_1 = 0,25r = 0,25 \cdot 0,3 = 0,08 \text{ мм};$$

$$h_2 = 0,5r = 0,5 \cdot 0,3 = 0,15 \text{ мм};$$

$$h_3 = 0,75r = 0,75 \cdot 0,3 = 0,23 \text{ мм};$$

$$h_4 = r = 0,3 \text{ мм};$$

$$h_5 = 1,5r = 1,5 \cdot 0,3 = 0,45 \text{ мм};$$

$$h_6 = 1,75r = 1,75 \cdot 0,3 = 0,5 \text{ мм}.$$

Затем сформированные ленты из нитей испытывали на разрывной машине при скорости хода подвижного зажима  $v = 500$  мм/мин. Образец ленты для этого предварительно разделяли с одного конца на отдельные нити, четные и нечетные, которые склеивали лейкопластырем. Эти разделенные концы нитей закреплялись в зажимах разрывной машины. Длина расчетного участка определена силой адгезии нитей и равна  $L = 100$  мм. Сила адгезии нитей определялась по формуле (5.2.13).

На рисунке 5.5 в качестве примера представлены графические зависимости  $\rho = f(h)$ , рассчитанные по уравнению (5.2.3) и полученные экспериментально. Расхождение между нитями не превышает 15...18%. Таким образом, уравнение (5.2.13) может быть использовано для расчета основных параметров работы каландра при формировании лент из нитей различного диаметра.

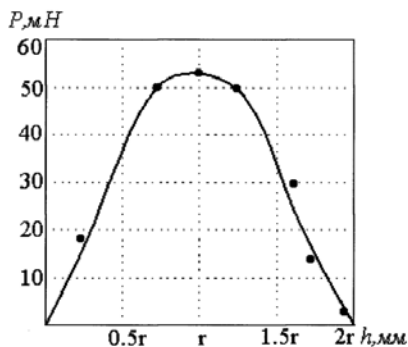


Рис. 5.5. Сила адгезии между нитями в ленте:  
 $l$  – теоретическая кривая; точки – эксперимент

### 5.3. РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ЦИКЛА МЕЖДУ ЧИСТКАМИ ТРУБОПРОВОДОВ ОТ ЛАТЕКСНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Одним из недостатков латексной технологии является отложение латексного геля в подводящей системе трубопроводов, что приводит к изменению концентрации латексной смеси и необходимости периодической чистки системы. Поэтому возникает вопрос теоретического рассмотрения механизма гелеобразования при движении латексной смеси в трубопроводе.

Как отмечается в работе [33], до настоящего времени нет количественной теории и единого взгляда на физическую сущность главных факторов, определяющих поведение латексов под влиянием напряжений сдвига. Имеется ряд публикаций [53, 69, 70], в которых механическая коагуляция латекса объясняется гидродинамическими факторами, вызывающими возрастание эффективности соударения частиц и их коагуляции.

Особый интерес представляет предложение А. В. Лебедева [33] и еще раньше С. С. Воюцкого о том, что при механическом воздействии на латекс его астабилизация происходит за счет предварительного частичного механического отрыва защитных слоев от поверхности глобул, вращающихся друг относительно друга с высокими скоростями.

Рассмотрим движение латекса в круглой трубе, как показано на рис. 5.6. Из гидродинамики известно [66], что за счет торможения частиц у стенок они начинают вращаться с определенной угловой скоростью, которая может быть определена для случая ламинарного режима по формулам:

$$\omega = v_{\max} \frac{r}{R^2}; \quad v_{\max} = \frac{\partial P}{\partial x} \frac{R^2}{4\mu}, \quad (5.3.1)$$

где  $v_{\max}$  – максимальная скорость движения частиц;  $r$  – расстояние до частицы по радиусу;  $R$  – внутренний радиус трубы;  $\partial P / \partial x$  – изменения давления по длине трубопровода;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости.

Используя гипотезу А. В. Лебедева, можно представить процесс коагуляции частиц латекса и их отложение на стенках трубы в виде следующей зависимости:

$$\frac{dr}{d\tau} = -K\omega, \quad (5.3.2)$$

т.е. считаем, что скорость отложения геля пропорциональна угловой скорости вращения частиц  $\omega$ ;  $K$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от ряда астабилизирующих факторов.

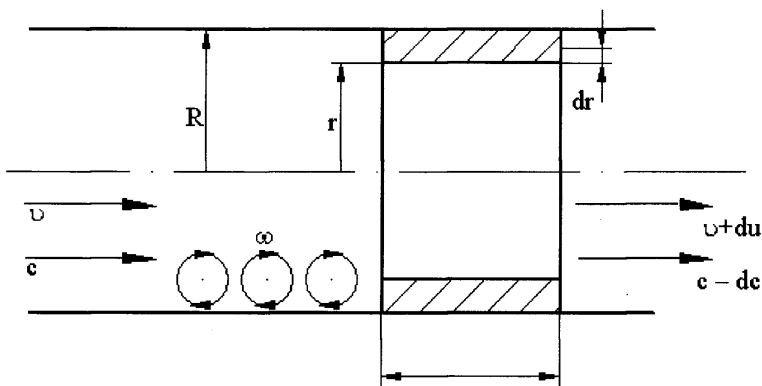


Рис. 5.6. Схема течения латекса в трубопроводе

Подставим в (5.3.2) значения величин из (5.3.1). Тогда

$$\frac{dr}{d\tau} = -K \frac{\partial P}{\partial x} \frac{r}{4\mu}. \quad (5.3.3)$$

В свою очередь [41]

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{8\mu Q}{\pi r^4}, \quad (5.3.4)$$

где  $Q$  – объемный расход латекса в трубопроводе.

При перекачивании латекса по трубопроводу, в зависимости от используемого насоса, может быть случай, когда например, подача постоянна  $Q = \text{const}$ , или постоянен гидравлический уклон  $\partial P / \partial x = \text{const}$ .

Для первого случая значение  $\partial P / \partial x$  из (5.3.4) подставим в (5.3.3) и проинтегрируем для условия, что при  $\tau = 0$ ,  $r = R$

$$r = \sqrt[4]{R^4 - \frac{8KQ\tau}{\pi}}. \quad (5.3.5)$$

Из (4.2.22) можно определить теоретическое время зарастания трубопровода отложившимся гелем. Так, для  $r = 0$

$$\tau = \frac{\pi R^4}{8KQ}. \quad (5.3.6)$$

Для случая постоянства гидравлического уклона  $\partial P / \partial x = a$  интегрирование уравнения (5.3.3) приводит к зависимости

$$r = R e^{-\frac{aK\tau}{4\mu}}. \quad (5.3.7)$$

Уравнения (5.3.5) и (5.3.7) показывают зависимость толщины отложившегося на стенках трубопровода геля в зависимости от физико-механических свойств латекса и времени. Они являются качественно справедливыми для любых режимов течения, так как максимальные напряжения сдвига и скорость вращения частиц наблюдаются у стенок трубы, поэтому и вероятность коагуляции и отложения частиц так же максимальны у стенок.

При движении латекса в трубе и его отложении на стенках происходит изменение проходного сечения и концентрации латекса. При неизменном градиенте давления на бесконечно малом участке длиной  $dx$  за время  $d\tau$  будем иметь баланс массы (рис. 5.6):

$$dM = dM_1 - dM_2 . \quad (5.3.8)$$

Накопление геля на стенке трубы

$$dM = c_k 2\pi r dr dx . \quad (5.3.9)$$

где  $c_k$  – концентрация каучука в геле.

Масса каучука на входе в выделенный элемент

$$dM_1 = v c \pi r^2 d\tau , \quad (5.3.10)$$

где  $c$  – концентрация каучука в латексе;  $v$  – скорость движения латекса.

Масса каучука на выходе из элемента

$$dM_2 = (v + dv)(c - dc) \pi r^2 d\tau . \quad (5.3.11)$$

Подставим (5.3.8), (5.3.7) и (5.3.6) в (5.3.5) и после преобразований получим

$$\frac{dr}{d\tau} = \frac{r}{2c_k} \left( v \frac{dc}{dx} - c \frac{dv}{dx} \right) . \quad (5.3.12)$$

При постоянном расходе  $Q = \pi r^2 v$ . Откуда

$$v = \frac{Q}{\pi r^2}; \quad dv = -2 \frac{Q}{\pi} \frac{dr}{r^3} .$$

Подставим эти значения в (5.3.12) и получим

$$\frac{dr}{d\tau} = \frac{Q}{2c_k \pi r} \left( \frac{dc}{dx} + 2c \frac{1}{r} \frac{dr}{dx} \right) . \quad (5.3.13)$$

Считаем, что отложение геля на стенке трубы происходит равномерно, т.е.  $dr/dx = 0$ . Тогда после подстановки в (5.3.13) величины  $dr/d\tau$  из (5.3.3) будем иметь

$$\frac{dc}{dx} = -\frac{4Kc_H}{r^2}. \quad (5.3.14)$$

Интегрирование этого уравнения для условия, что при  $x = 0 - c = c_0$ , т.е. начальной концентрации латекса и замены через его значение из (5.3.5), дает решение

$$c = c_0 - \frac{4Kc_k x}{\sqrt[4]{R^4 - \frac{8KQ\tau}{\pi}}}. \quad (5.3.15)$$

Выражение (5.3.15) определяет концентрацию латекса при его движении в трубопроводе при транспортировании и отложении геля на стенках в зависимости от времени и пройденного пути. Полученные уравнения (5.3.5), (5.3.7) и (5.3.15) описывают поведение латекса при механической коагуляции за счет действия гидродинамического фактора, приводящего к отрыву защитных слоев глобул.

На рисунке 5.7 приведена графическая зависимость изменения радиуса  $r$  по формуле (5.3.15). Уравнение (5.3.15) было использовано для определения времени до профилактической чистки трубопровода в зависимости от технических требований эксплуатации.

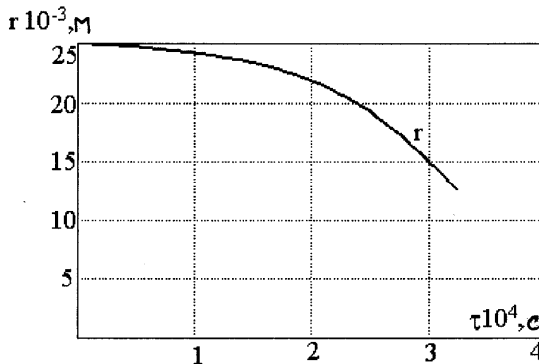


Рис. 5.7. Изменение радиуса трубы при движении латекса

#### **5.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЛИНИИ И ОПТИМАЛЬНОЙ ЧИСЛЕННОСТИ ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА**

В связи с задачей повышения интенсификации производства, модернизации существующего оборудования и создания нового, особое внимание уделяется вопросам оптимального проектирования и оптимизации режимов протекающих технологических процессов. Этим вопросам посвящено большое число работ [16, 17, 10, 11, 12, 28, 40, 55, 57], однако имеется ряд вопросов, которые в настоящее время являются проблемными и находятся на уровне постановочных задач. К этим задачам относятся такие, как расчет показателей эффективности работы сложного оборудования и линий по изготовлению резиновых нитей из латекса, вопросы имитационного моделирования различных технологических операций их производства, количественная оценка показателей работы человека-оператора и ряд других.

Все решенные ранее теоретические вопросы по оптимальному проектированию и оптимизации режимных переменных различных технологических объектов предполагают, что объект и система управления находятся в состоянии нормальной работоспособности, когда все узлы и элементы работают без отказов или частичного нарушения нормальной работоспособности; потоки сырья, теплохладоагентов, их параметры соответствуют требованиям регламента.

При эксплуатации различного типа линий изготовления резиновых изделий из латекса часто имеет место, когда функционирование отдельных узлов или элементов линий нарушено. Это приводит, как правило, к снижению эффективности их работы. Кроме того, имеют место явления, когда нарушение в работе отдельных элементов может приводить к аварийным ситуациям, остановке оборудования, выпуску бракованной продукции и т.д.

Нарушение работоспособности отдельных элементов оборудования всегда происходит случайно, в непредвиденные моменты времени. Так как между нарушением работоспособности и эффективностью функционирования оборудования имеется прямая связь, то эффективность в силу этого носит вероятностный характер. Поэтому решение задач оптимизации изготовления различных резиновых изделий из латекса должно производиться с учетом вероятностных характеристик работоспособности отдельных элементов линий.

Существующие в настоящее время задачи анализа и синтеза сложных систем решаются без учета нарушений функционирования отдельных ее элементов или путем введения довольно приближенных коэффициентов, которые определяются методами теории надежности на основе рассмотрения потоков отказов.

При этом предполагается, что исследуемый объект (элемент) может находиться только в двух состояниях – работоспособном или неработоспособном. Однако эффективность сложных объектов должна определяться для любых моментов времени с учетом их работоспособности, т.е. возникает необходимость определения большого числа возможных состояний работоспособности и вероятностей этих состояний.

Так как состояние работоспособности объекта в общем случае меняется случайно во времени, то введем множество состояний работоспособности  $H$ , элементы которого  $h$  будут отличаться состояниями работоспособности отдельных составных частей рассматриваемого объекта. Множество  $H$  будем строить следующим образом. Считаем, что объект состоит из  $n$  отдельных элементов, которые при рассмотрении конкретных задач не подлежат дальнейшему делению. Эти элементы в процессе функционирования объекта могут принимать различные состояния по своей работоспособности. Самый простой случай имеет место, когда элемент выполняет свои функциональные обязанности, т.е. находится в состоянии нормальной работоспособности, или не выполняет своих функций. В общем случае каждый  $i$ -й элемент может находиться в  $m_i$ -состояниях. Переход элемента из одного состояния в другое происходит в случайные моменты времени, так же случайно будет изменяться и состояние работоспособности объекта  $H_i$ .

Если все элементы объекта находятся в состоянии нормальной работоспособности, то объект находится в состоянии нормальной работоспособности. Обозначим состояние нормальной работоспособности через  $h_0$ , а через  $h_i$  – состояние объекта, характеризующееся нарушением работоспособности, при котором нарушены функции  $i$ -го элемента, через  $h_{ij}$  – состояние работоспособности, при котором нарушены функции  $i$ -го и  $j$ -го элементов, причем  $i$ -й элемент отказал первым и т.д.

Тогда состояние  $h \in H$  характеризует объект в смысле нарушения работоспособности его отдельных частей. Эти состояния, связанные с изменением входов  $x$ , будем называть состоянием работоспособности. Состояние работоспособности является вероятностной характеристикой, которое подлежит определению. Расчет вероятностей  $P(h)$  состояний работоспособности можно проводить, используя методологию и терминологию, заложенную в теории надежности [16, 17]. Как показывает анализ работы оборудования по изготовлению различных резиновых изделий из латекса, большинство отказов отдельных элементов оборудования не приводит к полной остановке объекта, а снижает эффективность его работы. Эффективность  $E$  на интервале функционирования объекта  $[0, T]$  можно определить по формуле

$$E = \sum_{h \in H} \int_0^T \left[ P(h, t) \int_{f \in F} e(h, f, t) \varphi(t) df \right] dt, \quad (5.4.1)$$

где  $f$  – возмущения;  $P(h, t)$  – вероятности, не зависящие от  $f$ ;  $e(h, f, t)$  – эффективность объекта в момент времени  $t$  при возмущении  $f$  и состоянии функционирования  $h$ .

Основными исходными данными для расчета вероятностей  $P(h, t)$  являются законы распределения времени нормальной работоспособности элементов объекта между отказами и ремонтами схемы соединения элементов в смысле надежности [16] и виды избыточности, особенности функционирования, типы узлов и элементов, а также сведения об отказах, восстановлении и схеме обслуживания.

В производстве резиновых нитей из латекса очень часто имеет место ситуация, когда один или несколько элементов оборудования отказывают в работе. При этом эффективность производства падает. Для восстановления работоспособности требуется время на ремонт, который обеспечивает обслуживающий персонал. Поэтому для получения высокой эффективности работы оборудования требуется оптимальное количество рабочего персонала, так как малое или большое их число снижает экономические показатели производства.

В качестве примера рассмотрим расчет оптимальной численности персонала, исходя из работы узла коллектора фильер.

В настоящее время численность персонала для обслуживания линий по изготовлению резиновых нитей из латекса составляется на основе практического опыта их эксплуатации. При этом производительность линии определяется из условия ее нормальной работоспособности, т.е. работоспособности с номинальной производительностью  $B_0$ , определяемой допустимым технологическим режимом. Однако в процессе эксплуатации всегда имеют место различного рода отказы со стороны отдельных рабочих элементов и узлов линии. Так имеют место обрыв нити у фильер, склеивание отдельных нитей, адгезия нитей на валках. Все это ведет к уменьшению производительности, которую будем называть текущей  $B$ . Уменьшение текущей производительности происходит также за счет износа теплостойкой ленты конвейера в сушильной камере и обрывов при намотке нити на катушки. Чаще всего при большинстве отказов линия продолжает функционировать, но с меньшей производительностью  $B < B_0$ .

Восстановление нормальной работоспособности линии обеспечивается определенной системой обслуживания, в которую входит численность обслуживающего персонала  $r$ , наличие запасных частей и приори-



тетность. Будем рассматривать влияние только численности обслуживающего персонала.

В простейшем случае линия может находиться в двух состояниях: в состоянии нормальной работоспособности и в состоянии, когда она не может выполнять своих функций. Переход линии из одного состояния в другое происходит случайным образом. Совокупность состояний отдельных узлов и элементов линии определяет состояние ее работоспособности или элемент множества состояний  $H$  работоспособности линии. Состояние  $h \in H$  характеризует работоспособность линии в смысле нарушения функций ее составных частей и, соответственно, эффективности ее работы.

Вероятность состояния нормальной работоспособности линии можно определить из выражения

$$P(h_0) = \frac{1}{z}, \quad (5.4.2)$$

где

$$z = 1 + \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^i \rho_j; \quad \rho_j = \frac{\lambda_j}{\mu_j}; \quad \lambda = \frac{1}{T_0}; \quad \mu = \frac{1}{T_p},$$

$T_0$  – время наработки на отказ;  $T_p$  – время ремонта.

Вероятность состояния линии при различных условиях работоспособности

$$P(H_j) = P_i P(H_{j-1}), \quad (5.4.3)$$

а показатель эффективности работы линии

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (n - j) P(H_j), \quad (5.4.4)$$

где  $n$  – число работающих элементов линии.

В приложении 1 представлены средние показатели надежности основных элементов и узлов линии изготовления нитей на Волжском заводе «Латекс» по данным журнала эксплуатации.

Рассмотрим работу узла коллектора фильер, в котором наиболее часто имеют место отказы в работе, что ведет к уменьшению производительности и наибольшим затратам времени на восстановительные работы по сравнению с другими узлами линии. В связи с этим поставим задачу оптимизации численности обслуживающего персонала при различных условиях работоспособности узла.

Состояние работоспособности узла можно представить в виде графа рис. 5.8, в котором узлы определяют вероятность состояния линии при различных условиях работоспособности, а стрелками показан переход из одного состояния в другое в результате отказов и восстановления после ремонта.

Производительность линии при нормальной работоспособности можно определить по формуле

$$B_0 = v k f \rho_p, \quad (5.4.5)$$

где  $v$  – скорость нити;  $k$  – число фильер в коллекторе;  $f$  – сечение нити;  $\rho_p$  – плотность резины.

В процессе эксплуатации, как было указано, имеет место отказ в работе фильер. Выход их из строя и восстановление в работу происходит случайным образом. Так же случайно меняется и текущая производительность линии  $B$ , которая зависит от состояния работоспособности узла, его эффективности  $E$ , которая в свою очередь зависит от численности персонала  $r$ .

Тогда текущая производительность определяется из выражения

$$B = B_0 E(r). \quad (5.4.6)$$

Уравнения (5.4.2) – (5.4.6) определяют математическую модель процесса с учетом изменения состояний работоспособности линии по узлу фильер.

Важнейшим экономическим критерием для оценки работы линии может служить себестоимость выпускаемой продукции [12]

$$S = \frac{1}{B} (S_1 + S_2 + S_3), \quad (5.4.7)$$

где  $S_1$  – затраты на сырье;  $S_2$  – постоянные затраты;  $S_3$  – переменные затраты, определяемые, в основном, численностью персонала.

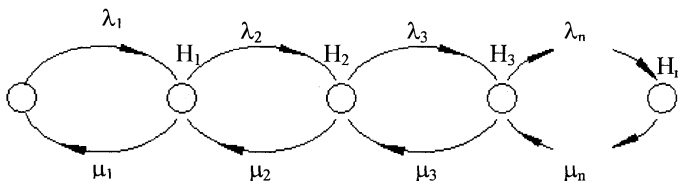


Рис. 5.8. Графическое состояние работоспособности узла коллектора фильер

При выходе из строя фильер, связанных с обрывом нити, латекс вытекает и идет в брак. В этом случае затраты на сырье постоянны и определяются производительностью при нормальной работоспособности. К переменным затратам будут относиться расходы, зависящие от численности персонала и его оплаты. С учетом сказанного уравнение (5.4.7) можно записать в виде

$$S = \frac{1}{B_0 E(r)} (A + \alpha r), \quad (5.4.8)$$

где  $A = S_1 + S_2$ ,  $S_3 = \alpha r$  – расходы на одного рабочего.

Вид функции  $E(r)$  при числе фильер  $K = 300$  для различных значений  $\rho$  (см. рис. 5.6). Ее можно аппроксимировать уравнением

$$E = E_{\max} (1 - e^{-br}), \quad (5.4.9)$$

где  $b$  – показатель степени, определяемый видом кривой.

Тогда себестоимость продукции  $S$  в зависимости от состояния работоспособности узла коллектора фильер  $P(H_i)$  и численности персонала  $r$  определится по формуле

$$S = \frac{A + \alpha r}{E_0 E_{\max} (1 - e^{-br})}. \quad (5.4.10)$$

Оптимальное значение  $r^*$  определим из условия минимума себестоимости продукции  $S$ . Для этого продифференцируем (5.4.10) по  $r$  и приравняем нулю полученное выражение. Будем иметь

$$e^{br} = 1 + br + \frac{Ab}{\alpha}. \quad (5.4.11)$$

Введем обозначения

$$f_1(r) = e^{br}, \quad f_2(r) = 1 + br + \frac{Ab}{\alpha}.$$

На рисунке 5.10 представлены графические зависимости функций  $f_1(r)$  и  $f_2(r)$ . При этом значение  $\rho = 0,01$  взято на основе данных журнала эксплуатации линии изготовления латексных нитей на Волжском заводе «Латекс». Так, среднее время безотказной работы коллектора фильер составляет  $T_0 = 34$  ч, а время ремонта  $T_p = 0,3$  ч. Коэффициент  $b = 0,6$  принят из вида кривой  $I$  (рис. 5.9). Значение  $A/\alpha = 0,7$  подобрано на основе затрат и количества обслуживающего персонала. Точка пересечения графиков определяет оптимальное значение величины  $r^* \approx 3$ , что соответствует количеству рабочих смены, обслуживающих линию.

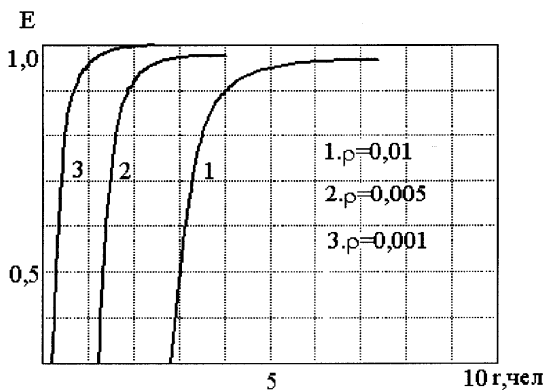


Рис. 5.9. Зависимость эффективности работы узла фильер  $E$  от численности обслуживающего персонала  $r$

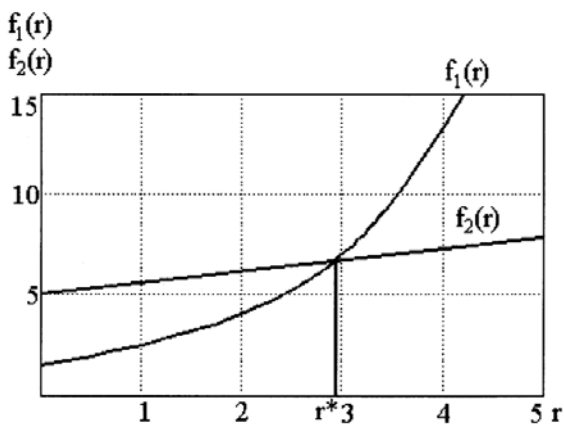


Рис. 5.10. Графическое определение оптимальной численности обслуживающего персонала  $r$

Основные результаты данной работы и другие перспективные исследования по теме изложены авторами в следующих научных статьях [80 – 92].

### Выводы по главе 5

1. Разработана линия по изготовлению нитей и лент из латекса диаметром до 0,6 мм.

2. Предложена принципиально новая система дозирования латексной смеси, основанной на гидродинамике потоков. Приведены расчетные формулы обеспечения работоспособности данной схемы.

3. Предложен метод расчета оборудования для производства лент из нитей. Отклонения расчетных и экспериментальных значений не превышают 18%. Расчетные уравнения использованы для определения основных параметров каландра.

4. Рассмотрен вопрос отложения латексного геля в подводящем трубопроводе и получена расчетная формула определения времени зарастания трубопровода, позволяющая выявить периодичность их чистки.

5. Проведено определение эксплуатационной надежности разработанной линии и оптимальной численности обслуживающего персонала.

6. Разработанная линия принята к внедрению в ОАО НИИРТмаш, Тамбов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

---

1. Показана возможность повышения эффективности процесса производства резиновых нитей из латекса при использовании дополнительной технологической операции – синерезиса латексных гелей в жидких теплоносителях.

2. Определен тип жидкого теплоносителя для процесса синерезиса латексных гелей – глицерин, обеспечивающий повышение эффективности тепло- и массообменных процессов и качества получаемых нитей при условии ограничения температуры до 110 °С.

3. Экспериментально изучены кинетика и механизмы физических процессов, протекающих при выполнении основных технологических операций при производстве резиновых нитей из латекса. Определены ограничения на значения режимных переменных, при которых достигаются заданные показатели качества изделия.

4. Составлено математическое описание основных технологических операций процесса производства резиновых нитей: нитеобразования в ванне коагуляции, синерезиса латексных гелей в глицерине и конвективной сушки резиновых нитей.

5. Сформулирована и решена задача оптимизации режимных переменных и конструктивных параметров производства резиновых нитей из латекса, обеспечивающих минимальные массогабаритные показатели линии при заданном качестве продукции и максимальной производительности оборудования.

6. Разработана линия по производству резиновых нитей из латекса диаметром до 0,6 мм и лент, габаритные размеры которой на 30% меньше существующих аналогов. Для линии разработан новый тип дозирующего устройства подачи латекса, проведены расчеты оборудования для производства лент из нитей, процессов отложения геля на стенках трубопроводов с целью определения периодичности их чистки, определена эксплуатационная надежность и оптимальная численность обслуживающего персонала. Разработанный технический проект линии, методика расчета и программное обеспечение внедрены в АО «НИИРТмаш» Тамбова.

7. Методика расчета оптимальных размеров ванн коагуляции, синерезиса, промывки и габаритов сушилки, а также программное обеспечение используется в учебном процессе ФГБОУ ВПО «ТГТУ» при изучении дисциплины «Оборудование для переработки полимерных материалов» при подготовке инженеров по направлению 655400 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, в нефтехимии и биотехнологии».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. **Александрова, Е. М.** Исследование агрегатной устойчивости синтетических латексов / Е. М. Александрова, Л. А. Шиц // Докл. АН СССР. – 1962. – С. 36 – 39.
2. **Алфрей, Т.** Механические свойства полимеров / Т. Алфрей. – М. : ИЛ, 1952.
3. **Амелина, Н. В.** О механической коагуляции латекса / Н. В. Амелина, В. И. Астафьев // Труды ТГТУ. – 2000. – Вып. 6. – С. 70 – 74.
4. **Амелина, Н. В.** Вытяжка и промывка латексных нитей. Термообработка латексных гелей / Н. В. Амелина, В. И. Астафьев // 5-я науч. конф. ТГТУ. – 2000. – С. 47–48.
5. **Амелина, Н. В.** Движение латексных нитей в ваннах промывки / Н. В. Амелина, М. В. Соколов // Труды ТГТУ. – 2003. – Вып. 13. – С. 56 – 59.
6. **Описание** формирования резиновых нитей из латекса / Н. В. Амелина, П. С. Беляев, А. С. Клинков, М. В. Соколов и др. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2003. – Т. 9, № 2. – С. 236 – 242.
7. **К вопросу** синерезиса латексных гелей / Н. В. Амелина, П. С. Беляев, А. С. Клинков, М. В. Соколов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2003. – Т. 9, № 4. – С. 669 – 673.
8. **Амелина, Н. В.** Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление процесса изготовления резиновых нитей из латекса : автореф. ... канд. техн. наук / Амелина Н. В. – Тамбов, 2004. – 16 с.
9. **Кульбашный, А.** Разработка процесса и оборудования для изготовления латексной пенорезины : автореф. ... канд. техн. наук / А. Кульбашный. – Тамбов, 2012. – 16 с.
10. **Безденежных, А. А.** Инженерные методы составления уравнений скоростей реакций и расчета кинетических констант / А. А. Безденежных. – Л. : Химия, 1973. – 256 с.
11. **Безденежных, А. А.** Математические модели химических реакторов / А. А. Безденежных. – Киев : Техника, 1970. – 176 с.
12. **Бояринов, А. И.** Методы оптимизации в химической технологии / А. И. Бояринов, В. В. Кафаров. – М. : Химия, 1969. – 576 с.
13. **Бахшиева, Л. Т.** Механизмы и кинетика удаления дисперсионной среды при формировании пленок из синтетических латексов. Технология легкой промышленности / Л. Т. Бахшиева, Б. М. Чесунов // Изд-во ВУЗов. – 1976. – № 4. – С. 52 – 57.
14. **Воюцкий, С. С.** Влияние природы и количества стабилизатора на желатинирование латексов (хлоропреновых) / С. С. Воюцкий, А. М. Савинкова, В. В. Черная // Каучук и резина. – 1962. – № 8. – С. 7 – 12.

15. **Изготовление** резиновых нитей из латекса / В. П. Горбунов и др. – М. : ЦНИИТЭнефтехим, 1989. – 25 с.
16. **ГОСТ 13377–75.** Надежность в технике. Термины и определения. – М. : Изд-во Стандартов, 1975. – 6 с.
17. **ГОСТ 21705–76.** АСУТП. Надежность. Основные положения. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 6 с.
18. **О концентрировании** латексных гелей при электронном обложении / Ю. В. Грубман и др. // Коллоидный журнал. – 1976. – Т. 38, № 5. – С. 970 – 972.
19. **Исследование** влияния концентрации латекса на процесс электронного обложения / Ю. В. Грубман и др. // Коллоидный журнал. – 1975. – Т. 37, № 2. – С. 356 – 359.
20. **Грубман, Ю. В.** Исследования в области синерезиса латексных гелей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю. В. Грубман. – ВГУ, 1971.
21. **Гуль, В. Е.** Структура и механические свойства полимеров / В. Е. Гуль, В. А. Кузнецов. – М. : Высшая школа, 1966. – С. 99.
22. **Денисов, О. Л.** Экономия энергии при тепловой сушке / О. Л. Денисов, В. И. Леончик. – М. : Энергоиздат, 1986. – 136 с.
23. **Дмитриев, Г.** Не засушить бы сушку / Г. Дмитриев, А. Пасканов. – ВДНХ СССР, 1987. – № 2. – С. 28–29.
24. **Исследования** в области высокомолекулярных соединений / Б. А. Догадкин и др. – Изд-во НА СССР, 1949.
25. **Влияние** фракционного состава олеиновой кислоты на процесс получения и свойства латекса СКС-С / В. Ю. Ерофеев и др. // Синтетические латексы, их модифицирование и применение в народном хозяйстве : тез. докл. Всесоюзн. конф. 15 – 17 сент. 1981 г. – Воронеж, 1981. – С. 91.
26. **Закгейм, Ю. А.** Введение в моделирование химико-технологических процессов / Ю. А. Закгейм. – М. : Химия, 1973. – 224 с.
27. **Зонтаг, Г.** Коагуляция и устойчивость дисперсных систем / Г. Зонтаг, К. Штрэнге. – Л. : Химия, 1973. – 148 с.
28. **Калман, Р.** Очерки по математической теории систем / Р. Калман. – М. : Мир, 1971. – 400 с.
29. **Принципы** математического моделирования химико-биологических систем / В. В. Кафаров и др. – М. : Химия, 1974. – 344 с.
30. **Кафаров, В. В.** Методы кибернетики в химии и химической технологии / В. В. Кафаров. – М. : Химия, 1971. – 496 с.
31. **Кафаров, В. В.** Моделирование химических процессов / В. В. Кафаров. – М. : Химия, 1971. – 496 с.
32. **Вязкость** и устойчивость латексов в присутствии солей бутадиев-карбоксилатных сополимеров (БКС) / В. Л. Кузнецов и др. // Проблемы синтеза. Исследование свойств и переработки латексов. – М. : ЦНИИТЭнефтехим, 1971. – С. 68 – 71.



33. **Лебедев, А. В.** Коллоидная химия синтетических латексов / А. В. Лебедев. – Л. : Химия. – 100 с.
34. **Лебедев, А. В.** Агрегатная устойчивость синтетических латексов по отношению к различным воздействиям / А. В. Лебедев // Каучук и резина. – 1963. – № 11. – С. 14 – 19.
35. **О механизме образования коагулома при испарении влаги с поверхности латекса / А. В. Лебедев и др. // Каучук и резина. – 1973. – № 2. – С. 14 – 16.**
36. **Левеншпиль, О.** Инженерное оформление химических процессов / О. Левеншпиль. – М. : Химия, 1969. – 621 с.
37. **Левич, В. Г.** Физико-химическая гидромеханика / В. Г. Левич. – М. : Физматгиз, 1969. – 356 с.
38. **Лесков, В. П.** Численные методы решения уравнения теплопроводности / В. П. Лесков. – Чита : Изд-во ЧГТУ, 1997. – 96 с.
39. **Линия** для производства нитей из латекса. – Экспресс информация. Сер. ХМ-2. – М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1983. – № 1.
40. **Липатов, Л. Н.** Типовые процессы химической технологии как объекты управления / Л. Н. Липатов. – М. : Химия, 1973. – 317 с.
41. **Лыков, А. В.** Теплообмен. Справочник / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1978. – 480 с
42. **Ускоренный** метод оценки устойчивости латексов к испарению влаги / Б. М. Люминарский и др. // Каучук и резина. – 1970. – № 9. – С. 13 – 16.
43. **Майзелис, Б. А.** Производство резиновых изделий из латекса // Современные достижения в области физико-химии латексов, структуры вулканизатов и биохимии переработки латексов / Б. А. Майзелис. – М. : ЦНИИТЭнефтехим, 1971. – С. 34 – 62.
44. **Малкин, А. Я.** Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения / А. Я. Малкин, А. Е. Чалых. – М. : Химия, 1979. – 30 с.
45. **Взаимодействие** электролитов с латексами в процессе явной коагуляции / Г. К. Митрошкина и др. // Коллоидный журнал. – 1970. – Т. 32, № 3. – С. 875 – 880.
46. **Мурой, С.** // Сеньи то когё. – 1986. – Т. 1, № 3. – С. 151 – 159.
47. **Напарьин, Ю. А.** Теплофизические свойства резины и полиуретанов / Ю. А. Напарьин, И. Н. Ефимов, Н. А. Вдовин // Каучук и резина. – 1981. – № 2. – С. 29.
48. **Нейман, Р. Э.** О теории агрегативной устойчивости / Р. Э. Нейман // Современные достижения в области физико-химии латексов, структуры вулканизаторов и технологии переработки латексов. – М. : ЦНИИТЭнефтехим, 1971. – С. 67 – 69.
49. **Нейман, Р. Э.** О механической коагуляции латексов // Латексы и поверхностно-активные вещества / Р. Э. Нейман, А. К. Егоров. – Воронеж, 1971. – С. 7 – 12.

50. **К характеристике** кинетики и коагуляции латексов при замораживании / Р. А. Нейман и др. // Латексы. – Воронеж: ВГУ, 1973. – С. 24 – 28.
51. **Нейман, Р. Э.** Влияние электролитов на механическую коагуляцию синтетических латексов / Р. Э. Нейман, А. К. Егоров // Колл. журнал. – 1977. – Т. 39, вып. 3. – С. 582 – 584.
52. **Исследование** устойчивости и коагуляции латекса от концентрации и валентности коагулирующих ионов / Р. Э. Нейман и др. // Колл. журнал. – Т. 24, № 4. – С. 494 – 496.
53. **Нейман, Р. Э.** Коагуляция синтетических латексов / Р. Э. Нейман. – Л. : Химия, 1976. – С. 52.
54. **Нобль, Р. Дж.** Латекс в технике / Р. Дж. Нобль. – М. : Госхимиздат, 1962. – 896 с.
55. **Островский, Г. М.** Методы оптимизации сложных химико-биологических систем / Г. М. Островский, Ю. М. Волин. – М. : Химия, 1970. – 328 с.
56. **Отчет по теме 59 – 74.** Научно-исследовательские работы по созданию оборудования для изготовления полых трубчатых изделий из латекса. – Тамбов : ВНИИРТМАШ, 1982. – 38 с.
57. **Полляк, Ю. Г.** Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах / Ю. Г. Полляк. – М. : Сов. Радио, 1971. – 400 с.
58. **Особенности** механической коагуляции латексов, стабилизированных ионными эмульгаторами, в присутствии ионных ПАВ / И. И. Полякова и др. // Новые синтетические латексы и теоретические основы процессов латексной технологии. – М. : ЦНИИТЭнефтехим, 1975. – С. 199 – 209.
59. **Рабинович, Н. З.** Гидравлика / Н. З. Рабинович. – М. : Физматгиз, 1963. – 408 с.
60. **Райнер, Д.** Деформация и течение / Д. Райнер. – М. : ГНТИ нефтяной и горнотопливной литературы, 1963. – С. 376.
61. **Кинетические** закономерности процесса сушки латексных пленок / С. П. Рудобашта и др. // Каучук и резина. – 1977. – № 1. – С. 11 – 13.
62. **Изменение** структурно-механических свойств каучуковых латексов при желатинировании / Д. М. Сандомирский и др. // Коллоидный журнал. – 1962. – Т. 24, № 2. – С. 320 – 322.
63. **Смирнов, М. М.** Дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка / М. М. Смирнов. – М. : Наука, 1964. – 523 с.
64. **Сухарева, Л. А.** Вопросы пленкообразования из латексов / Л. А. Сухарева // Новые синтетические латексы и теоретические основы процессов латексной технологии. – М. : НИИР, 1975. – С. 32 – 45.
65. **Торнер, Р. В.** Теоретические основы переработки полимеров / Р. В. Торнер. – М. : Химия, 1977. – С. 28.
66. **Фабрикант, Н. Я.** Аэродинамика / Н. Я. Фабрикант. – Л., 1949. – Ч. 1. – С. 152.

67. **Фрэнкс.** Математическое моделирование в химической технологии / Фрэнкс. – М. : Химия, 1971. – 272 с.
68. **Хорафас, Д. Н.** Системы и моделирование / Д. Н. Хорафас. – М. : Мир, 1967. – 419 с.
69. **Blackley, D. C.** High Polymer Latices / D. C. Blackley. – London–N. Y., 1966. – 856 p.
70. **Holscher, F.** Dispericonen Sintetisc her Hochpolymeren / F. Holscher. – Berlin–Heidelberg–N. Y. Bd. 1, 1969. – 182 s.
71. **Hwa, J. C. H. J.** Pol. Sci., 1964. – V. 2. – P. 785.
72. **Ottewill, R. H., Shwa J. N.** Disc. Far. Soc, 1966. – V. 42. – P. 154.
73. **Sanders, F. L., Sanders J. W. J.** Coll. Sci., 1956. – V. 11. – P. 260.
74. **Sliemers, R. A., a. o. Rubb.** Chem. a. Tech. 1960. – V. 33. – P. 535.
75. **Stramberger, P. J.** Coll. Sci., 1962. – V. 17. – P. 146.
76. **Schutz, W.** Untersuchungen zur Koagulations – Fahigkeit Naturlichen und Syntetischer Latices beim Nassspinnverfahren / W. Schutz. – Forschungsbericht des Landes Nordheim – Westfalen, 1976. – P. 1 – 44.
77. **Wenning, H.** Koll. Z., 1957. – Bd. 154. – S. 154.
78. **Вода** в дисперсных системах // Б. В. Дерягин., Н. В. Чураев, Ф. Д. Овчаренко и др. – М. : Химия, 1989. – 288 с.
79. **Чураев, Н. В.** Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах / Н. В. Чураев. – М. : Химия, 1990. – 272 с.
80. **Чалых, А. Е.** Диффузия в полимерных системах / А. Е. Чалых. – М. : Химия, 1987. – 312 с.
81. **Рудобашта, С. П.** Диффузия в химико-технологических процессах / С. П. Рудобашта, Э. М. Карташов. – М. : Химия, 1993. – 208 с.
82. **Амелина, Н. В.** О механической коагуляции латекса / Н. В. Амелина, В. И. Астафьев // Труды ТГТУ. – 2000. – Вып. 6. – С. 70 – 74.
83. **Амелина, Н. В.** Вытяжка и промывка латексных нитей. Термообработка латексных гелей / Н. В. Амелина, В. И. Астафьев // V науч. конф. ТГТУ : тез. докл. – Тамбов, 2000. – С. 47–48.
84. **Амелина, Н. В.** Движение латексных нитей в ваннах промывки / Н. В. Амелина, М. В. Соколов // Труды ТГТУ. – 2003. – Вып. 13. – С. 56 – 59.
85. **Описание** формирования резиновых нитей из латекса / Н. В. Амелина, П. С. Беляев, А. С. Клинков, М. В. Соколов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2003. – Т. 9, № 2. – С. 236 – 242.
86. **К вопросу** синерезиса латексных гелей / Н. В. Амелина, П. С. Беляев, А. С. Клинков, М. В. Соколов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2003. – Т. 9. – № 4. – С. 669 – 673.
87. **К вопросу** тепло-массообмена при изготовлении латексных нитей / Н. В. Амелина, П. С. Беляев, А. С. Клинков, М. В. Соколов // Труды ТГТУ. – 2004. – Вып. 15. – С. 91 – 94.

88. **Амелина, Н. В.** Дозатор латексной смеси в линии изготовления нитей / Н. В. Амелина, П. С. Беляев, М. В. Соколов // IX науч. конф. ТГТУ : тез. докл. – Тамбов, 2004. – С. 55–56.

89. **Кульбашный, А. С.** Разработка конструкции вспенивателя латексной смеси методика его расчета / А. С. Кульбашный, А. С. Клинков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 643 – 648.

90. **Интенсификация** сушки латексных гелей / Н. В. Амелина, А. С. Кульбашный, А. С. Клинков, В. Г. Однолько // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2010. – № 7 – 9(30). – С. 325 – 328.

91. **Определение** расхода коагулянта при гелеобразовании / Н. В. Амелина, А. С. Кульбашный, А. С. Клинков, П. С. Беляев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2010. – № 7 – 9(30). – С. 322.

92. **Режимы** движения формы при изготовлении маканых изделий из латекса / Н. В. Амелина, А. С. Кульбашный, А. С. Клинков, В. Г. Однолько // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2010. – № 10 – 12(31). – С. 355.

93. **Экспериментальные** исследования работы вспенивателя лабиринтного типа / Н. В. Амелина, А. С. Кульбашный, А. С. Клинков, В. Г. Однолько // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2011. – № 2(33). – С. 368.

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

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### III. Средние показатели надежности основных элементов и узлов линии изготовления резиновых нитей, установленной на Волжском заводе «Латекс» по данным журнала эксплуатации

№	Наименование	Наработка на отказ, ч	Время восстановления, ч
1	Дозатор	400	3
2	Коллектор фильер	1	0,01
3	Ванна коагуляции	1200	1,5
4	Ванна промывки	1200	1,5
5	Камера сушки и вулканизации	8000	17
6	Талькатор	930	12
7	Машина образования лент	580	8
8	Лентоукладчик	1000	15
9	Машина намоточная	1,5	0,02
10	Привод	2200	36
11	Редукторы	3500	18
12	Электродвигатели	9600	28
13	Узлы подшипников	12 000	12
14	Лента транспортерная	4500	6
15	Привод валков	2500	37
16	Обогревательные паровые эл.	4000	12
17	Приборы КИПа	2300	7
18	Вентилятор	9600	28

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НИТЕЙ ИЗ ЛАТЕКСА .....	6
1.1. Латексы и их свойства .....	6
1.2. Технологический процесс изготовления латексных нитей .....	10
1.2.1. Линия изготовления латексных нитей .....	10
1.2.2. Система подачи латексной смеси к ванне коагуляции .....	12
1.2.3. Ванны коагуляции и вытяжки .....	13
1.2.4. Камера сушки и вулканизации .....	14
1.2.5. Контроль качества нитей и лент .....	15
Выводы по главе 1 .....	17
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РЕЗИНОВЫХ НИТЕЙ ИЗ ЛАТЕКСА .....	18
2.1. Основные технологические операции при производстве резиновых нитей из латекса .....	18
2.2. Интенсификация процесса получения резиновых нитей из латекса .....	19
2.3. Лабораторная установка для непрерывного получения резиновых нитей из латекса .....	20
2.4. Результаты экспериментальных исследований .....	22
Выводы по главе 2 .....	25
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ РЕЗИНОВЫХ НИТЕЙ ИЗ ЛАТЕКСА .....	26
3.1. Математическое описание процесса нитеобразования в ванне коагуляции .....	26
3.2. Математическая модель процесса синерезиса латексного геля в теплоносителе .....	35
3.3. Математическое описание процесса воздушно-тепловой сушки резиновых нитей .....	40
Выводы по главе 3 .....	42

4. АППАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЛАТЕКСНЫХ НИТЕЙ .....	43
4.1. Постановка задачи оптимизации .....	43
4.2. Определение оптимальных размеров ванны коагуляции .....	44
4.3. Расчет оптимальных размеров ванн для синерезиса латексных гелей в глицерине .....	44
4.4. Определение размеров ванн промывки .....	45
4.5. Расчет оптимальной длины камеры сушки .....	45
4.6. Сравнение базового варианта технологического процесса с предлагаемым .....	45
Выводы по главе 4 .....	46
5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ .....	47
5.1. Система дозирования латекса .....	47
5.2. Оборудование для производства лент из нитей .....	53
5.3. Расчет времени цикла между чистками трубопроводов от латексных отложений .....	58
5.4. Определение эксплуатационной надежности работы линии и оптимальной численности обслуживающего персонала .....	62
Выводы по главе 5 .....	68
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ .....	70
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	71
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	77

Научное издание

АМЕЛИНА Наталия Валерьевна  
БЕЛЯЕВ Павел Серафимович  
КЛИНКОВ Алексей Степанович  
СОКОЛОВ Михаил Владимирович

**КИНЕТИКА И АППАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ  
ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
РЕЗИНОВЫХ НИТЕЙ ИЗ ЛАТЕКСА**

*Монография*

Редактор И. В. Калистратова  
Инженер по компьютерному макетированию М. Н. Рыжкова

ISBN 978-5-8265-1405-4



Подписано в печать 21.01.2015.  
Формат 60 × 84/16. 4,65 усл. печ. л.  
Тираж 500 экз. Заказ № 24

Издательско-полиграфический центр  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14.  
Тел./факс (4752) 63-81-08, 63-81-33.  
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru