

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донской государственный технический университет»
Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал)
На правах рукописи

Ларина Людмила Васильевна

**Методология исследования и разработки процессов и оборудования
для обработки натуральных кож гигротермическим воздействием
на их микроструктуру в условиях вакуума**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(лёгкая промышленность)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени доктора технических наук

Научный консультант—доктор
технических наук, профессор
Першин В.А.

Шахты – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	10
ГЛАВА 1. КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ ГИГРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОЖЕВЕННО- ОБУВНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	19
1.1. Виды гигротермической обработки кожевенных материалов, их сущность и место в технологическом процессе изготовления обуви	19
1.2. Технологии и оборудование для гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов	28
1.2.1. Технологии и оборудование гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов и направления её интенсификации	28
1.2.2. Технологии и оборудование для гигротермической обработки с использованием вакуума и их влияние на качество и эксплуатационные свойства кожевенно-обувных материалов.....	33
1.3. Краткий обзор математических моделей тепломассообменных, деформационно-релаксационных процессов и их взаимосвязей при гигротермической обработке кожевенно-обувных материалов	40
1.3.1. Система дифференциальных уравнений молярно-молекулярного тепломассопереноса	40
1.3.2. Критериальные уравнения высокоинтенсивного тепломассопереноса	44
1.3.3. Уравнения взаимосвязи тепло-массообменных и деформационно- релаксационных процессов, протекающих при сушке дисперсных материалов.....	48
1.3.4. Обоснование применения метода теории подобия функционирования технических систем для создания моделей взаимосвязи тепломассообменных и релаксационно-деформационных процессов при интенсифицированной гигротермической обработке (ИГО) кожевенных материалов	51

1.4. Цель задачи диссертационного исследования	55
ВЫВОДЫ.....	56
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВАКУУМНО-СОРБЦИОННОГО УВЛАЖНЕНИЯ..	58
2.1. Исследование интенсивности массопереноса в системе капилляров кожи в зависимости от фазового состояния влаги	58
2.2. Исследование интенсивности массопереноса в зависимости от изменения концентрации пара по длине капилляра в условиях вакуума	60
2.3. Исследование влияния капиллярно-сорбционного процесса конденсации пара в системе микрокапилляров кожи на интенсивность увлажнения в условиях вакуума.....	64
2.4. Исследование интенсивности капиллярной конденсации пара в системе капилляров в условиях вакуума за счёт теплообмена.....	70
ВЫВОДЫ.....	74
ГЛАВА 3. МИКРОКАПИЛЛЯРНАЯ СТРУКТУРА КОЖИ КАК ОБЪЕКТ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОЙ ГИГРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВАКУУМА	75
3.1. Влияние структуры кожи на её деформационные свойства и относительную влажность	75
3.2. Физико-статистические модели распределения микрокапилляров в структуре кож.....	77
3.2.1. Модель равномерного распределения микрокапилляров в структуре материала образца натуральной кожи	77
3.2.2. Модель с наименьшим числом микрокапилляров в структуре материала образца натуральной кожи.....	80
3.3. Методика экспериментальной проверки разработанной модели равномерного распределения микрокапилляров в структуре материалов ..	85
ВЫВОДЫ.....	87
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОЙ ГИГРОТЕРМИЧЕСКОЙ	

ОБРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ ВАКУУМА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАТУРАЛЬНЫХ КОЖ	88
4.1. Цель и задачи исследований	88
4.1.1. Объекты экспериментальных исследований	89
4.1.2. Методика статистической обработки данных	90
4.1.3. Экспериментальная установка для исследования влияния способов подачи пара на относительную влажность кож хромового дубления и систем материалов	91
4.1.4. Методика проведения экспериментов	96
4.1.5. Исследование интенсивности вакуумно-сорбционного увлажнения на установке с парогенератором вне камеры	97
4.1.6. Исследование интенсивности вакуумно-сорбционного увлажнения на установке с парогенератором внутри камеры	100
4.2. Исследование влияния длительности процесса вакуумно-сорбционного увлажнения на относительную влажность кож хромового дубления	101
4.3. Задачи и методика исследований влияния параметров процесса вакуумно-сорбционного увлажнения на показатели физико-механических свойств, определяющих формуемость кож хромового дубления и систем материалов	104
4.4. Влияние длительности процесса вакуумно-сорбционного увлажнения на относительную влажность кож хромового дубления различной выработки	113
4.4.1. Статистический анализ закона распределения показателей относительной влажности долевых образцов кож	116
4.4.2. Статистический анализ закона распределения показателей относительной влажности для поперечных образцов кож	122
4.5. Исследование влияния режимов интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви на показатели физико-механических свойств кож хромового дубления	127

4.5.1. Задачи и объект исследований.....	127
4.5.2. Конструкция экспериментального стенда для исследования режимов гигротермической обработки заготовок верха обуви.....	128
4.5.3. Методика экспериментальных исследований влияния режимов гигротермической обработки заготовок верха обуви в условиях вакуума на показатели физико-механических свойств, определяющих формоустойчивость кож хромового дубления	131
4.5.3.1. Методика экспериментальных исследований режимов гигротермической обработки заготовок верха обуви в условиях вакуума	131
4.5.3.2. Методика испытаний заготовок верха обуви после гигротермической обработки в условиях вакуума на формоустойчивость.....	132
4.5.4. Расчёт технологических параметров экспериментальной установки для гигротермической обработки.....	134
4.5.4.1. Определение массы насыщенного пара в нижней камере экспериментальной установки	134
4.5.4.2. Расчёт парогенератора.....	135
4.5.4.3. Определение перепада давления для прижатия заготовки к колодке.....	136
4.6. РЕЗУЛЬТАТЫ исследования влияния параметров процесса интенсифицированной гигротермической обработки на показатели физико-механических свойств кож хромового дубления, характеризующих формоустойчивость.....	137
4.6.1. Экспериментальные исследования влияния параметров сушки в условиях вакуума	137
4.6.2. Экспериментальные исследования влияния параметров влажно-тепловой обработки в условиях вакуума	138
4.6.3. Экспериментальные исследования влияния параметров интенсифицированной гигротермической обработки в условиях.....	139

4.7. Определение оптимальных режимов вакуумно-сорбционного увлажнения перед формованием деталей верха обуви	143
ВЫВОДЫ.....	152
ГЛАВА 5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ «ТЕХНИКА-ТЕХНОЛОГИЯ-ПРОДУКЦИЯ» ПРИ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОМ ГИГРОТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА КОЖЕВЕННО-ОБУВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ПРОЦЕССЕ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ	
5.1. Основные положения метода подобия функционирования технических систем «техника-технология-продукция» при интенсифицированном гигротермическом воздействии	154
5.1.1. Критерии подобия технического состояния как обобщённые параметры системы «техника-технология-продукция» при интенсифицированном гигротермическом воздействии	154
5.1.2. Обобщённые индикаторы подобия как средства оценки и достижения требуемого технического состояния системы «техника-технология-продукция» при интенсифицированной гигротермической обработке	158
5.2. Основные принципы методологии подобия функционирования технических систем «техника-технология-продукция»	160
5.3. Общие положения моделирования подобия функционирования процессов интенсифицированной гигротермической обработки.....	166
5.4. Модели подобия функционирования процессов гигротермической обработки (увлажнения, фиксации, сушки и влажно-тепловой обработки) в условиях вакуума	170
5.4.1. Математическая модель подобия функционирования подсистемы «технология-увлажнение»	173
5.4.2. Математическая модель подобия функционирования подсистемы «технология-фиксация»	176

5.4.3. Математическая модель подобия функционирования подсистемы «технология-сушка»	178
5.4.4. Математическая модель подобия функционирования подсистемы «технология-влажно-тепловой обработка»	182
5.5. Основные положения и условия метода стохастического подобия функционирования технических систем при исследовании процессов интенсифицированной гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов.....	185
5.5.1. Методика формирования математических моделей стохастического подобия функционирования подсистем интенсифицированной гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов.....	186
5.5.2. Математическая модель стохастического подобия функционирования подсистемы интенсифицированной гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов – «увлажнение»	190
5.5.3. Математическая модель стохастического подобия функционирования подсистемы интенсифицированной гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов – «фиксация»	196
5.5.4. Математическая модель стохастического подобия функционирования подсистемы интенсифицированной гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов – «сушка»	203
5.5.5. Математическая модель стохастического подобия функционирования подсистемы интенсифицированной гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов – «влажно-тепловая обработка»	210
5.5.6. Математическая модель стохастического подобия функционирования подсистемы интенсифицированной	

гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов – «технология» при совмещении увлажнения, фиксации, сушки, влажно-тепловой обработки с использованием перфорированных колодок	216
В Ы В О Д Ы	219
ГЛАВА 6. СИСТЕМА КОНСТРУКТОРСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИГО	221
6.1. Подсистема формирования технического состояния оборудования для ИГО на этапе проектирования	221
6.1.1. Методология и пример разработки подсистемы «оборудование для увлажнения»	221
6.1.2. Методология и пример разработки подсистемы «оборудование для увлажнения, формования и сушки»	224
6.1.3. Методология и пример разработки подсистемы «оборудование для гигротермической фиксации»	224
6.2. Подсистема формирования технического состояния оборудования для ИГО на этапе его модернизации	226
6.2.1. Методология и пример разработки подсистемы «оборудование для увлажнения со сниженной энергоёмкостью»	226
6.2.2. Методология и пример разработки подсистемы «оборудование для увлажнения с парогенератором внутри камеры»	228
6.2.3. Методология и пример разработки подсистемы «оборудование для увлажнения с регулируемым объёмом рабочей камеры»	231
6.3. Методология создания способов интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви	234
6.3.1. Методология и пример создания способов интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви с применением перфорированных колодок	234

6.3.2. Методология и пример создания способа интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви с применением вакуума и давления	235
6.3.3. Методология и пример создания способа интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви с циклическим приложением вакуума и давления.....	237
6.4. Подсистема обеспечения технического состояния оборудования для интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви на этапе его эксплуатации.....	239
6.4.1. Методология и пример создания способа регулирования параметров интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви	239
6.4.2. Методология и пример создания способа управления интенсифицированной гигротермической обработкой заготовок верха обуви	242
6.5. Подсистема обеспечения технического состояния оборудования для интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви на этапе диагностики	245
6.5.1. Методология и пример создания способа определения относительной влажности кожевенно-обувных заготовок.....	245
6.6. Разработка алгоритма для системы автоматического регулирования процессом ИГО	252
ВЫВОДЫ.....	254
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ РАБОТЫ.....	255
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	257
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	276

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Повышение производственного потенциала лёгкой промышленности на основе технического перевооружения и модернизации производств за счёт использования передовых зарубежных технологий и внедрения инновационных отечественных разработок является одной из основных задач Стратегии развития лёгкой промышленности России на период до 2020 г., утверждённой 24 сентября 2009 г. Министерством промышленности и торговли Российской Федерации [125].

Для реализации этих задач существенная роль отводится малому бизнесу, работающему в сфере лёгкой промышленности, особенностью которого является высокая мобильность, позволяющая предприятиям осуществлять быструю смену ассортимента качественной конкурентоспособной продукции без уменьшения объёма продаж. Эта задача невыполнима без использования современных технологических процессов и оборудования, обеспечивающих наиболее эффективные по степени воздействия на структуру кожевенно-обувных материалов способы обработки.

Следовательно, решение поставленных в Стратегии задач требует исследования и реализации новых способов и оборудования, в том числе и для интенсифицированной гигротермической обработки (ИГО) кожевенно-обувных материалов.

При изготовлении кожаной обуви, доля которой в общем объёме производства составляет порядка 65 %, выполняются операции «увлажнение», «влажно-тепловая фиксация», «сушка», «влажно-тепловая обработка», сопровождающиеся гигротермическим воздействием на заготовки верха обуви.

Целью гигротермического воздействия является не только обеспечение требуемого технологией влагосодержания заготовок обуви после каждой операции, но и проведение этих операций с максимально возможной производительностью при минимальных энергетических затратах и гарантированном воздействии на микрокапиллярную структуру кожи.

Анализ исследований в области интенсифицированного гигротермического воздействия (ИГВ) на кожевенно-обувные материалы показывает, что в отечественной и зарубежной практике ведётся активный поиск путей интенсификации технологий, основанных на изменении скорости влагопереноса за счёт применения вакуума, импульсного, циклического его приложения. Однако при этом не учитываются возможности интенсификации процессов за счёт создания строго направленных на бахтармянную сторону заготовок тепло- и влагопотоков и возможного при этом совмещения ряда технологических операций на соответствующем унифицированном оборудовании.

Одной из причин, препятствующей созданию такого оборудования, является отсутствие до настоящего времени научно обоснованной методологии, основанной на математических моделях, объединяющих параметры процессов гигротермической обработки с показателями физико-механических свойств обрабатываемых материалов и оборудования. Такие модели позволят устанавливать критерии качества обработки как для известных, так и для предлагаемых в данном диссертационном исследовании технологий, назначать режимы обработки, создавать и эксплуатировать на практике высокопроизводительное, энергосберегающее, унифицированное гигротермическое оборудование.

Таким образом, разработка методологии создания процессов и унифицированного оборудования для энергосберегающих технологий интенсифицированной гигротермической обработки путём воздействия на микроструктуру натуральных кожевенно-обувных материалов является актуальной.

Объект исследования. Процессы и унифицированное гигротермическое оборудование для интенсифицированной гигротермической обработки путём воздействия на микроструктуру натуральных кож в условиях вакуума.

Предмет исследования. Совокупность моделей процессов интенсифицированной гигротермической обработки натуральных кож в условиях вакуума, объединяющих показатели их физико-механических свойств с параметрами процессов и унифицированного оборудования.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка методологии создания процессов и унифицированного оборудования для энергосберегающих технологий интенсифицированной обработки натуральных кожевенно-обувных материалов гигротермическим воздействием на их микроструктуру в условиях вакуума.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- анализ современных технологий и соответствующего оборудования для интенсифицированной гигротермической обработки натуральных кожевенно-обувных материалов и оборудования, применяемых при изготовлении обуви в условиях индивидуальных и массовых производств, позволивший сформулировать концепцию создания унифицированного оборудования для ресурсосберегающих технологий гигротермической обработки;

- формулировка и доказательство гипотезы о существовании в капиллярно-пористых телах при низких парциальном давлении и температуре в системе микрокапилляров кожи избирательной конденсации пара в условиях вакуума, способствующей интенсификации сорбции влаги в микрокапиллярах, образованию новых связей в структуре кожи, не разрушаемых при повторных воздействиях тепла и влаги, фиксации и сохранении её формы в новом зафиксированном состоянии при последующих интенсифицированных методах обработки;

- формирование концепции по созданию унифицированного гигротермического оборудования, реализующего возможность последовательно-параллельного совмещения технологических операций при интенсифицированной гигротермической обработке натуральных кожевенно-обувных материалов в условиях вакуума;

- разработка на основе теории случайных процессов аналитических выражений для функции распределения вероятности относительной влажности предварительно вакуумированных натуральных кожевенно-обувных материалов, позволяющих обосновать результаты экспериментальных исследований;

– формирование обобщённых моделей и критериев стохастического подобия функционирования процессов интенсифицированной гигротермической обработки, объединяющих показатели физико-механических свойств обрабатываемых материалов с параметрами режимов их обработки и соответствующего оборудования, и последующая их практическая апробация;

– разработка методики использования критериев стохастического подобия функционирования процессов ИГО для расчёта показателей физико-механических свойств обрабатываемых материалов и показателей обработки, обеспечивающих требуемые энергоэффективность и производительность оборудования;

– разработка структурных, функциональных, кинематических и принципиальных схем оборудования для интенсифицированного гигротермического воздействия на кожевенно-обувные материалы в условиях вакуума;

– практическая реализация способов интенсифицированного гигротермического воздействия при обработке натуральных кожевенно-обувных материалов на унифицированном оборудовании с использованием перфорированных колодок, обеспечивающих подачу тепла и влаги с бахтармянной стороны кожи;

– разработка и внедрение в производство рекомендаций по унификации оборудования для интенсифицированной гигротермической обработки с применением вакуума.

Научная новизна работы состоит в следующем:

– впервые выдвинута и подтверждена гипотеза о существовании при низких парциальном давлении и температуре избирательной конденсации пара в системе микрокапилляров кожи в условиях вакуума, способствующей интенсификации сорбции влаги в микрокапиллярах, образованию новых связей в структуре кожи, не разрушаемых при повторных воздействиях тепла и влаги, фиксации и сохранению её формы в новом зафиксированном состоянии при последующих интенсифицированных методах обработки;

– впервые сформулирована и обоснована концепция исследования и разработки унифицированного оборудования для ресурсосберегающих технологий интенсифицированной гигротермической обработки натуральных кожевенно-обувных материалов в условиях вакуума, основанная на принципах системности теоретических положений гипотезы, а также математических моделей детерминированных и стохастических взаимосвязей параметров технологических процессов, капиллярной структуры кожи, оборудования;

– разработаны математические модели, раскрывающие теоретические положения гипотезы, в том числе: модель избирательной конденсации пара в системе микрокапилляров кожи в условиях вакуума; модель распределения микрокапилляров в натуральных кожевенно-обувных материалах; обобщённые модели связей параметров оборудования и технологических режимов с показателями физико-механических свойств обрабатываемых материалов, учитывающие их стохастический характер;

– разработана и реализована методика формирования выражений для критериев эффективности, интенсивности, пригодности оборудования для выполнения конкретной гигротермической операции и получения их численных значений на основе метода подобия функционирования процессов ИГО.

Теоретическая значимость работы:

1. Выдвинутая автором гипотеза, подтверждённая теоретически и экспериментально, о характере процесса конденсации пара в микрокапиллярах кожи в процессе интенсифицированного гигротермического воздействия в условиях вакуума и полученные на её основе математические модели вакуумно-сорбционного увлажнения являются определённым вкладом в теорию тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах.

2. Впервые разработана концепция создания унифицированного энергосберегающего оборудования для технологий интенсифицированной гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов в условиях вакуума, базирующаяся на основе обобщённых моделей, объединяющих подсистемы ИГО в условиях их стохастического подобия функционирования.

Практическая значимость работы:

– разработаны и запатентованы способы гигротермической обработки обувных материалов на перфорированных (пористых) колодках в условиях вакуума, а также устройства и установки для интенсифицированной гигротермической обработки натуральных кожевенно-обувных материалов на основе разработанных математических моделей;

– разработаны научно обоснованные исходные требования на проектирование технологического оборудования для интенсифицированного гигротермического воздействия на обувные детали с использованием вакуума.

Практическая значимость диссертационной работы подтверждена эффективностью внедрения её результатов и запросами промышленных предприятий: ЗАО «Прогресс», ООО «Таурус» г. Шахты, фирм «Гарант», «ENRIKO» г. Ростов-на-Дону и др. Способ определения относительной влажности кожевенно-обувных заготовок используется при экспериментальных исследованиях для косвенного контроля влажности в процессе вакуумно-сорбционного увлажнения.

Результаты исследований используются рядом ведущих вузов лёгкой промышленности и сервиса Российской Федерации (МГУДТ, СПбГУСЭ, ДГТУ). Они нашли применение в лекционных курсах по дисциплинам «Оборудование производств изделий из кожи и основы проектирования оборудования», «Технические средства предприятий сервиса», «Технология изделий из кожи», в курсовом и дипломном проектировании по соответствующим специальностям; включены во внутривузовские методические пособия (ЮРГУЭС, г. Шахты, 1991–2012 гг.), в учебное пособие для вузов России «Технические средства предприятий сервиса» (М.: Издательский центр «Академия», 2003 г.), нашли отражение в учебнике «Технология изделий из кожи» (авторы В.А. Фукин, А.Н. Калита. – М.: Легпромбытиздат, 1988 г.), использовались при подготовке кандидатской диссертации соискателем В.В. Смирновым, выполненной под руководством автора.

Документы, подтверждающие внедрение и практическое использование теоретических положений, выводов и рекомендаций, представлены в приложении к настоящей диссертации.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались: базовые основы теории тепломассопереноса, анализа и параметрического синтеза систем, основы математического моделирования, численные методы математической статистики, научного планирования эксперимента, программирования и логической алгоритмизации, метода подобия функционирования технических систем (ПФТС), комплексы программ, позволяющих получить результаты, адекватные исследуемым реальным процессам.

Положения, выносимые на защиту:

- положения и результаты, подтверждающие гипотезу о существовании при низких парциальном давлении и температуре избирательной конденсации пара в системе микрокапилляров кожи в условиях вакуума, способствующей интенсификации сорбции влаги в микрокапиллярах, образованию новых связей в структуре кожи, не разрушаемых при повторных воздействиях тепла и влаги, фиксации и сохранению её формы в новом зафиксированном состоянии при последующих интенсифицированных методах обработки;
- принципы и результаты реализации концепции создания унифицированного энергосберегающего оборудования для технологий гигротермической обработки с воздействием на микроструктуру натуральных кожевенно-обувных материалов в условиях вакуума, базирующейся в достаточной мере на системе разработанных математических моделей;
- математические модели: об избирательной конденсации пара в системе микрокапилляров кожи в условиях вакуума; о функции распределения вероятности относительной влажности предварительно вакуумированных натуральных кожевенно-обувных материалов; о системном характере связи показателей физико-механических свойств обрабатываемых материалов с па-

раметрами технологических режимов и оборудования, установленном посредством частных и обобщённых зависимостей и критериев подобия стохастического функционирования подсистем ИГО;

– методики формирования выражений для критериев эффективности, интенсивности, пригодности оборудования для выполнения конкретной гигротермической операции и получения их численных значений на основе метода подобия функционирования процессов ИГО.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается использованием автором в качестве теоретической и методологической базы диссертационного исследования фундаментальных трудов в области тепло-массопереноса, теории подобия, размерностей и моделирования; использованием современных теоретических и экспериментальных методов исследований, удовлетворительной сходимостью теоретических и экспериментальных результатов.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы были представлены и получили положительную оценку на областной научно-практической конференции «Повышение эффективности связи науки с производством» (г. Ростов-на-Дону – 1984 г.), на научно-практических конференциях Всесоюзного заочного института текстильной и лёгкой промышленности (1988–1990 гг.), на Всесоюзной научно-технической конференции молодых исследователей «Прогрессивная техника и технология, системы управления и автоматизированного проектирования в текстильной и лёгкой промышленности» (г. Москва, МТИ им. Косыгина, 1989 г.), на Всероссийской научно-технической конференции «Современные инновационные технологии и оборудование» (г. Тула – 2006 г.), на межвузовских и Всероссийских научно-технических конференциях Южно-Российского государственного университета экономики и сервиса (г. Шахты – 2007, 2008, 2009, 2010 гг.), на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы инновационного развития хлопкоочистительной, текстильной, лёгкой, полиграфической промышленности и подготовки кадров» (г. Ташкент – 2009 г.),

на Международной научно-технической конференции молодых специалистов, аспирантов и студентов «Математическое и компьютерное моделирование естественнонаучных и социальных проблем» (г. Пенза – 2009 г.), на Международной научно-практической конференции Восточно-Украинского национального университета им. В. Даля (г. Луганск – 2010 г.), на Международной научно-технической конференции «Современные наукоёмкие технологии и перспективные материалы текстильной и лёгкой промышленности» (Прогресс-2012) (г. Иваново – 2012 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 54 работы, в том числе 16 – в рекомендованных ВАК рецензируемых журналах центральной печати, 2 монографии, получено 12 авторских свидетельств СССР и патентов Российской Федерации на изобретения. Работа выполнялась по государственному заданию Министерства образования и науки РФ по теме «Разработка систем эффективной виброзащиты и обеспечения технического состояния машин для гигротермической обработки текстильных и кожевенных изделий в процессе их жизненного цикла» (2012–2013 гг.).

ГЛАВА 1. КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ ГИГРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОЖЕВЕННО-ОБУВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Виды гигротермической обработки кожевенных материалов, их сущность и место в технологическом процессе изготовления обуви

Гигротермическая обработка при производстве кожаной обуви, доля которой в общем объёме производства составляет подавляющую часть (65 %), включает операции «увлажнение», «влажно-тепловая фиксация», «сушка», «влажно-тепловая обработка», которые по достигаемым целям подразделяются на две группы.

1) Операции для придания обувным материалам свойств формуемости: увлажнение, влажно-тепловая и тепловая пластификация заготовок верха обуви. Они выполняются или перед формованием заготовок, или в промежутках между отдельными его этапами.

2) Операции, выполняемые для придания обуви формоустойчивости: основная сушка, влажно-тепловая обработка и тепловая фиксация формы обуви. Эти операции осуществляются преимущественно после завершения формования обуви, но некоторые из них в отдельных случаях могут проводиться между отдельными его этапами или совмещаться с формованием.

Виды операций при гигротермической обработке натуральных кожевенно-обувных материалов, в зависимости от требуемых целей на определённом этапе производства обуви, представлены в таблице 1.1 [4, 16].

Таблица 1.1 – Виды и цели операций при гигротермической обработке натуральных кожевенно-обувных материалов

Операции и режимы обработки	Обрабатываемые обувные материалы	Количество вводимой (+), удаляемой (-) влаги, %	Температурный интервал воздействия, °С	Время, мин.
ОБРАБОТКА ДЛЯ ПРИДАНИЯ ФОРМУЕМОСТИ				
Увлажнение сорбционное				
постоянные	Кожи хромового дубления	+(10...12)	35...60	90–120
переменные	Кожи хромового дубления	+(8...15)	1 этап – 45–50 2 этап – 20–25	1 этап – 40 2 этап – 45
осциллирующие (чередование подачи горячей и холодной паровоздушной смеси)	Кожи хромового дубления	+(8...15)	1 этап – 70–80 2 этап – 18–20	1 этап – 40; 2 этап – 45
осциллирующих с обработкой распылённой водой	Кожи хромового дубления	+(4...6)	1 этап – 45–50 2 этап – 20–25	1 этап – 40 2 этап – 45
Увлажнение вакуумно-сорбционное	Кожи хромового дубления	+(12...17)	70...75	3–5
Увлажнение термодиффузионное	Кожи хромового, реже хромтаннидного дубления	+(5...9)	90...110	0,1–0,5
Влажно-тепловая пластификация (фиксация) конвективным методом	Кожи хромового дубления	+(2...3)	70...80	1
Влажно-тепловая пластификация (фиксация) контактным методом	Кожи хромового дубления	+(1...0)	160...180	0,25
ОБРАБОТКА ДЛЯ ПРИДАНИЯ ФОРМОУСТОЙЧИВОСТИ				
Сушка основная 1				
конвективная	Натуральные кожи всех методов дубления, материалы подноски и задника	-(10...5)	80–120	15–30
радиационная			70–80	10–12
радиационно-конвективная			80–90	40
вакуумно-радиационная	Натуральные кожи всех методов дубления, материалы подноски задника	-(10...5)	120–150	3–5
Влажно-тепловая обработка формы	Кожи хромового дубления, эластичные материалы для подносков, термопластичные для подносков и задников; кожкартон для задников (формованных)	Первая стадия – увлажнение +(2...3) Вторая стадия – нагревание -(2...3)	60...70	1,5
			120–130	3,5

Из анализа данных, приведённых в таблице 1.1, следует, что критерием оценки для каждой из гигротермических операций является количество вводимой или удаляемой влаги. Но, как известно [142, 167], целью гигротермической обработки является не только обеспечение требуемого технологией влагосодержания заготовок обуви после каждой операции, но и скорость его достижения (интенсивность) и гарантированное воздействие на микрокапиллярную структуру кожи. Последнее требование особенно важно при выполнении первой из гигротермических операций – увлажнения для обеспечения требуемых показателей физико-механических свойств кож при последующем формовании и формоустойчивости готовой обуви после выполнения остальных гигротермических операций.

Вопросу влияния влаги на изменение показателей физико-механических свойств кожевенно-обувных материалов посвящены работы М.А. Файбишенко [154], Ю.Л. Кавказова [48, 49], А.В. Лыкова, Ю.А. Михайлова [100, 101], П.А. Ребиндера [24], Т.Е. Акуловой, Т.Ф. Таганцевой [5], И.П. Страхова [147], Е.Н. Цибизовой [163], А.С. Ратаутаса [129, 130], К.М. Зурабяна [41–43], Л.И. Адигезалова [4], Р.В. Луцыка [90–97] и др.

Наличие влаги, как показано в работах [48, 49], изменяет силы межмолекулярного воздействия, а последнее приводит к ослаблению электривалентных связей между боковыми цепями коллагена и, практически, к разрыву их под действием теплового движения. Влага также частично ослабляет или даже разрушает единичные электривалентные и водородные связи между полярными группами неупорядоченных областей структуры коллагена.

Г.И. Кутянининым [60] доказано, что влага сильно ослабляет или разрушает межмолекулярные ван-дер-ваальсовы связи между звеньями цепей.

Влага, являясь пластификатором, облегчает скольжение или перемещение сегментов молекул коллагена, развёртывание клубкообразных сплестений волокон при деформациях, способствует развитию релаксационных процессов. По данным М.А. Файбишенко [154], образцы с начальной влажно-

стью 40 и 60 % отличаются от воздушно-сухих образцов повышенной скоростью релаксации и значительно более низкими напряжениями.

Влага способствует образованию новых связей с более высоким потенциальным барьером, приводящим к фиксации структуры кожи в новом растянутом состоянии [175].

По данным М.П. Куприянова и Н.И. Шаповала [156] уровень абсолютной влажности 25–33 % приводится как оптимальный, при котором резко возрастает остаточная деформация. А.Н. Калитой и В.В. Щербаковым [51, 52, 170], при изучении зависимости формоустойчивости от влажности кож, установлено, что для получения удовлетворительной формоустойчивости абсолютная влажность должна быть равна 26 %.

Из работ ЦНИИКПа [47] следует, что увлажнение до влагосодержания 30 % приводит к минимизации остаточных напряжений.

Снижение прочностных свойств кожи при чрезмерном её увлажнении обусловливается раздвижением элементов структуры кожи под воздействием молекул воды. Поэтому для многих натуральных кож оптимум содержания влаги по показателям предела прочности при растяжении и удлинении при разрыве находится в пределах 30–35 % относительной влажности материала.

При увлажнении происходит изменение физико-механических свойств натуральных кож, обусловленное образованием различных связей влаги с материалом. Все формы связи по классификации академика П.А. Ребиндера [135], делят на три группы: химическую, физико-химическую и физико-механическую. Интенсивность энергии связи – энергии, затрачиваемой на разрушение связи является сновным признаком этой классификации. Наиболее прочная – химическая связь возникает при образовании кристаллогидратов. При этом образуется новое вещество, а вода, как свободная жидкость, исчезает. Химическая связь нарушается при прокаливании или химическом воздействии.

К физико-химически связанной влаге относится адсорбционная, осмотическая и структурная влага. Адсорбционно связанная влага отличается от

воды, так как не обладает свойствами свободной жидкости и не растворяет водорастворимые вещества, что особенно важно для процессов увлажнения кожи, не замерзает, что свидетельствует о значительной энергии связи. Адсорбционная влага образуется в результате присоединения молекул воды функциональными группами коллагена или полимеров.

Осмотическая влага образуется при избирательной диффузии воды через полупроницаемую мембрану, структурная – при формировании геля.

Влагу, находящуюся в капиллярах и связанную с ними силами поверхностного натяжения и капиллярным давлением, называют физико-механически связанной влагой. Капилляры, радиус которых меньше 0,1 мкм, называют микрокапиллярами, а влагу, заполняющую их, – микрокапиллярной. Капилляры с радиусом больше 0,1 мкм и меньше 10 мкм называют макрокапиллярами, а влагу, находящуюся в них, – макрокапиллярной. Если размер пор более 10 мкм, они не являются капиллярами, так как на влагу, заполняющую их, оказывает влияние сила тяжести. Жидкость, заполняющая поры и углубления размером более 10 мкм, называют влагой намокания или влагой смачивания [100]. Изменение физико-механических свойств кожи при увлажнении зависит не только от её влагосодержания, но и от характера обводнения.

При проведении технологических операций необходимо учитывать наличие различных форм связи влаги с материалом, по-разному воздействующих на его свойства [50].

Адсорбционная и микрокапиллярная влага существенно влияет на деформационные свойства кожи [167]. Адсорбционная влага занимает самые малые пространства, образуя сольватные оболочки вокруг полярных групп белковых цепей, и оказывает расклинивающее действие, раздвигая белковые цепи на расстояние от 1 до 1,4 мкм. Под влиянием адсорбционной влаги увеличиваются коэффициент поперечного сокращения материала, удлинения при различных напряжениях и предел прочности при растяжении, снижаются деформирующие усилия. Микрокапиллярная влага оказывает расклиниваю-

щее действие на стенки капилляра, увеличивая толщину и площадь кожи. Под влиянием микрокапиллярной влаги меняются механические свойства кожи при растяжении. Кожа таннидного дубления имеет максимальную прочность при увлажнении воздухом 97%-й влажности. Кожи хромового и хромтаннидного дубления в этих условиях имеют максимальное удлинение при растяжении.

Влага намокания, обладая свойствами свободной жидкости, может вымывать из кожи водорастворимые вещества, дубители, красители. Кроме того, влага намокания замедляет процесс сушки кожи, поэтому её называют балластной. Введение влаги намокания в кожу нежелательно.

Так как на формовочные свойства и формоустойчивость обуви в целом наибольшее влияние оказывает микрокапиллярная влага [64], то процесс увлажнения необходимо строить таким образом, чтобы добиться максимально интенсивного заполнения влагой микрокапиллярной структуры кожи.

При сушке кожи происходит перенос тепла и вещества, а также физико-химические превращения, осуществляются фазовые переходы [167]. Эти процессы подчиняются общим законам термодинамики необратимых процессов. При температурах ниже 50 °C явления переноса имеют главным образом диффузионный характер. Повышение температуры приводит к возникновению перепада температур между внешним и внутренним слоями высушиваемого материала, что приводит к дополнительному переносу массы и тепла. При температурах около 100 °C и атмосферном давлении возникает устойчивый градиент общего давления, под действием которого возникает поток пара, который увлекает за собой частицы жидкости и выносит их из материала в пограничный слой.

Выбор оптимального режима сушки кожи зависит от правильного использования законов переноса массы и тепла, коэффициентов и потенциалов переноса. Перенос влаги в твёрдых телах происходит под действием перепада влагосодержания (градиент влажности ∇U – изотермическая диффузия), перепада температуры (градиент температуры ∇T – термодиффузия), пере-

пада давления (градиент давления ∇P – бародиффузия). Градиенты влагосодержания и температуры могут иметь одинаковые и противоположные направления. При одинаковом направлении движение влаги усиливается, при противоположном – замедляется. Это вызывает усиление испарения влаги внутри материала, что может привести к ухудшению свойств материала, увеличению длительности сушки и расходов тепла [4].

Перенос массы в капиллярно-пористых телах, к которым относится кожа, более сложен и может происходить как в виде жидкости, так и в виде пара и зависит от характеристик пористой среды (величины и конфигурации пор, распределения пор по размерам, характера соединения пор между собой), состояния поверхности стенок пор, физико-химического сродства между молекулами воды и скелета твёрдого тела, температуры и степени заполнения пор [167].

Так как при максимально возможном заполнении влагой микрокапиллярной структуры кожи в процессе увлажнения их влага способствует образованию новых связей с более высоким потенциальным барьером, приводящим к фиксации структуры кожи в новом растянутом состоянии [175], то последующая после формования сушка может быть совмещена с ним, а количество удаляемой влаги из микрокапилляров кожи в виде пара эффузией может быть минимальным, так как образованные связи между молекулами воды, сорбируемыми микрокапиллярами и гидрофильными группами структурных элементов кожи, не разрушаются при повторных воздействиях тепла и влаги.

Для минимизации остаточных напряжений в коже после формования и основной сушки предназначен процесс влажно-тепловой обработки. При влажно-тепловой обработке заготовок верха обуви достигается снижение внутренних напряжений в материале без существенного изменения его влагосодержания, и эта операция является заключительной при гигротермической обработке.

При влажно-тепловой обработке, таким образом, происходит совместное действие влаги и тепла, способствующее интенсивному снижению уров-

ня внутренних напряжений (в результате происходит улучшение условий протекания релаксации напряжения).

Минимальная продолжительность процессов гигротермической обработки для придания обуви максимальной формоустойчивости может быть определена на основе анализа кривой релаксации напряжений [131], представленной на рисунке 1.1.

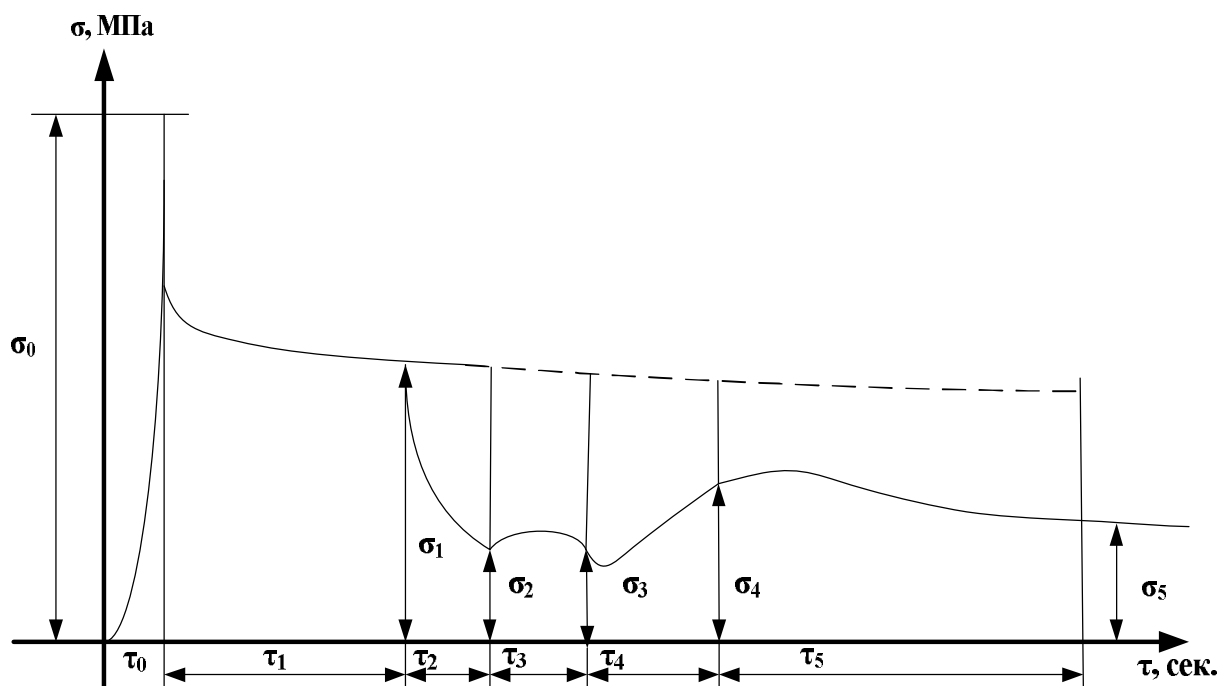


Рис. 1.1. Кривая релаксации напряжений в коже при формовании и гигротермической обработке

Весь процесс гигротермической обработки можно разбить на шесть отдельных периодов: τ_0 , τ_1 , τ_2 , τ_3 , τ_4 , τ_5 (рис. 1.1). Первый период τ_0 соответствует процессу формования увлажнённой заготовки на колодке. Время достижения требуемого значения деформации зависит от влажности заготовки и совместного действия температуры и нагрузки, строго ограниченных для каждого вида материала [16]. Во время периода τ_1 напряжение свободно релаксирует при переносе заготовок с одной установки на другую, уменьшить этот период возможно при совмещении операций формования и последующей влажно-тепловой пластификации (фиксацией) при соответствующих условиях под-

вода тепла и влаги, например, через перфорированную колодку. Период τ_2 связан с влажно-тепловой фиксацией заготовки. Интенсифицировать этот период возможно за счёт создания условий для эффузионного механизма переноса влаги по микрокапиллярам кожи, подводимой с бахтармянной стороны заготовки [82]. Во время периода τ_3 (пауза) имеет место незначительная обратная релаксация напряжений после подвода влаги, уменьшить этот период также возможно путём совмещения процессов влажно-тепловой пластификации и последующей сушки. Период τ_4 – нагрев материала с целью быстрого удаления введённой при увлажнении влаги с лицевой стороны заготовки, находящейся на колодке. Для интенсификации этого периода необходимо добиваться микрокапиллярного переноса влаги из заготовки в виде пара эффузией, отводя его с бахтармянной, а не с лицевой стороны заготовки, причём циклически. В этом периоде наблюдается снижение, затем постоянное возрастание напряжения. Последний период τ_5 , во время которого напряжение вначале продолжает возрастать, а затем уменьшается, служит для охлаждения изделия. Уменьшение этого периода возможно при приложении к заготовке, находящейся на колодке внешних нагрузок.

Анализ способов гигротермической обработки показал, что перенос влаги и тепла в зависимости от вида обработки происходит при различных начальных условиях, температурах, давлениях пара и длительности, влияющих на относительную влажность среды и в конечном счёте на относительную влажность обрабатываемых материалов и их физико-механические свойства.

Гигротермические операции, строго дифференцированные по видам обработки в специализированном оборудовании [126, 128], в условиях вакуума можно совмещать в унифицированном оборудовании, используя возможности интенсификации внешнего и внутреннего тепломассопереноса.

1.2. Технологии и оборудование для гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов

1.2.1. Технологии и оборудование гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов и направления её интенсификации

Наиболее распространённым способом увлажнения является сорбционный, обеспечивающий равномерное обводнение кожи, так как мелкие и средние капилляры, в которых конденсируется капиллярная влага, распределены равномерно, почти независимо от топографических участков кожи [43]. Основным недостатком сорбционного способа является значительная продолжительность.

Интенсификация внешнего массообмена при сорбционном способе увлажнения достигается за счёт повышения температуры, влажности и скорости движения влажного воздуха, применения соплового обдува, предварительного вакуумирования кожевенных материалов [2, 3, 10–12, 14].

Применение осциллирующего режима, введение в увлажнительную среду активирующих добавок, изменение механизма переноса влаги внутри материала за счёт применения вакуума обеспечивают интенсификацию внутреннего массообмена, который является определяющим при увлажнении кожевенных материалов [2, 3, 50].

Режимные параметры (температуры, влажности, скорости обдува) при интенсификации процесса сорбционного увлажнения имеют естественные пределы [2, 3, 5].

Осциллирующий режим предполагает воздействие более высокой температурой (40–50 °С) на первом этапе и более низкой (18–20 °С) – на втором, что позволяет интенсифицировать процесс сорбционного увлажнения. Ускорение введения влаги при таком способе увлажнения обусловлено сложным механизмом массообмена, особенности которого не вполне изучены [17]. Такой режим исключает конденсацию влаги на поверхности заготовок на первом этапе, обеспечивая конденсацию водяного пара внутри порис-

той структуры материала на втором этапе, а также снижает влагопотери перед формованием.

Типичными установками, реализующими сорбционный способ увлажнения, являются камера КУ-0, а также установка фирмы БУСМК [16, 150].

Для контактного (термодиффузионного) способа увлажнения предназначены установки типа УДВ-0, который принципиально отличается от рассмотренных выше способов. При этом способе влага движется под действием температурного градиента за счёт всех трёх видов термовлагопроводности (термодиффузии, капиллярной термовлагопроводности, относительной термодиффузии пара и воздуха) [167]. Существенно ускоряя процесс введения влаги по сравнению с сорбционным, интенсивное тепловое воздействие при температуре 75–105 °С затрагивает связи на уровне микроструктуры кожи, что приводит к нежелательным изменениям свойств материала. Недостатком термодиффузионного способа увлажнения является невозможность применения его для сушки на объёмных колодках.

Влажно-тепловая пластификация формы заготовок верха обуви проводится между отдельными этапами формования, способствуя сокращению продолжительности сушки или замене её на влажно-тепловую фиксацию. Процесс обычно осуществляется с помощью нагретого пара, выполняющего одновременно роль тепло- и влагоносителя [17].

Фиксация формы обуви при гигротермическом воздействии предназначена для достижения максимальной формоустойчивости готовой обуви, снятия большей части остаточных напряжений в коже после формования, сохранения формы готовой обуви в процессе носки. Данный вид воздействия делится на сушку и влажно-тепловую фиксацию формы [17].

При основной сушке удаляются растворители, вводимые при клеивании промежуточных деталей, излишняя влага, введённая в заготовку при увлажнении, для быстрой релаксации напряжений, в результате чего достигается максимальная формоустойчивость [167].

К комбинированным способам сушки обуви, относится радиационно-конвективный способ, реализуемый на установках типа ПРКС-О, где применяется тепло за счёт лучистой энергии и конвекция нагретого воздуха.

Одним из путей интенсификации сушки на базе основных положений теории и технологии сушки является повышение интенсивности внешнего и внутреннего теплообмена.

Общие закономерности тепло- и массообмена определяют следующие направления интенсификации сушки [167]:

1) увеличение температуры сушки до предельного значения без изменения технологических свойств материала. Так, при повышении температуры сушильного агента формоустойчивость обуви практически не снижается. Однако, если при сушке температура кожи превышает температуру сваривания, то резко снижается качество высушиваемого материала;

2) применение соплового обдува для сокращения длительности сушки, при котором резко уменьшается толщина граничного слоя паров воды, в результате чего снижается диффузионное сопротивление, препятствующее переносу влаги с поверхности материала в окружающее пространство. Увеличение коэффициента теплоотдачи от сушильного агента к высушиваемому материалу, т.е. увеличивает передаваемый тепловой поток;

3) осциллирующие режимы (циклическая сушка) позволяют ускорить процесс за счёт совпадения диффузионного и концентрационного потоков. Нагревание материала при этом сопровождается последующим охлаждением;

4) комбинированные способы сушки (кондуктивная и конвективная, конвективная и терморadiационная и др.) ускоряют процесс. Интенсивность комбинированной сушки увеличивается с увеличением скорости перемещения материала. В существующих сушильных установках этот способ интенсификации обычно применяется в комбинации с другими методами, например, с обдувом материала воздухом;

5) вакуумная сушка при контактном или терморadiационном подводе тепла обеспечивает изменение механизма перемещения тепла и влаги как внутри материала, так и на его поверхности.

Влажно-тепловая фиксация формы заготовки происходит при её нахождении на колодке на установках типа УТФ – 1. Процесс состоит из поочерёдной обработки затянутой на колодке заготовки верха обуви сначала влажным и тёплым, затем горячим, и в завершении - холодным воздухом.

На первом этапе при увлажнении подаётся тёплый влажный воздух, который характеризуется снижением напряжений до минимальных, далее – обработка горячим сухим воздухом при интенсивном повышении напряжений, охлаждение на последнем этапе и, как следствие, снижение напряжений.

Применение вакуума, как следует из анализа процессов для гигротермического воздействия, обеспечивает изменение физико-механических показателей свойств кож, характеризующих их формуемость и формоустойчивость с одновременным уменьшением времени воздействия.

Однако, все гигротермические операции (за исключением увлажнения) проводятся на колодке или пуансоне, а воздействие тепла и влаги осуществляется с внешней стороны заготовки верха обуви. Для возможного их совмещения с целью интенсификации процессов и унификации применяемого оборудования целесообразно применение перфорированных или пористых колодок [83, 86–89], что особенно актуально для малых и средних предприятий, которыми представлена в основном обувная отрасль России [127].

Направления интенсификации и повышения качества процессов гигротермической обработки натуральных кож представлены на рисунке 1.2.

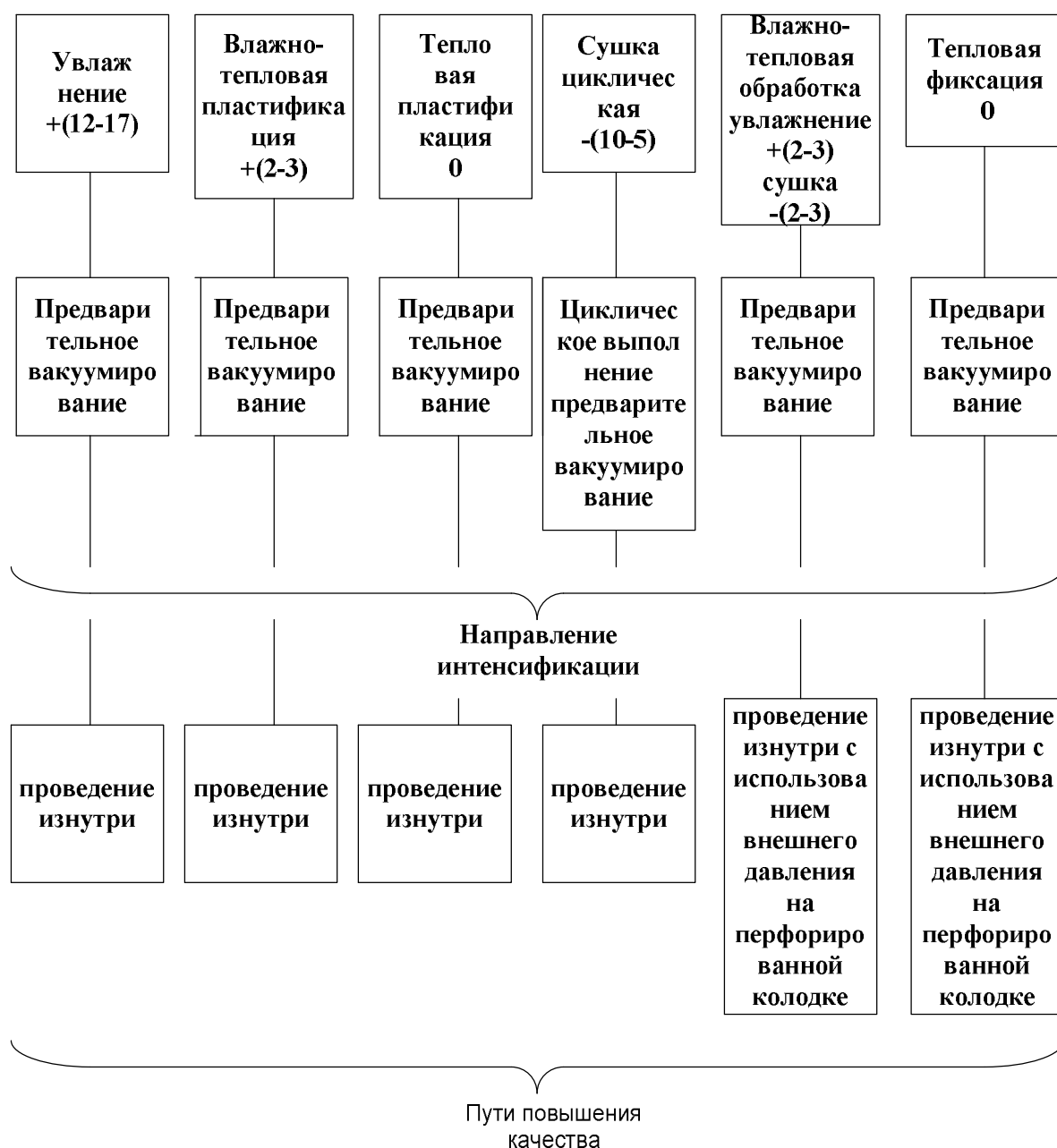


Рис. 1.2. Направления интенсификации и повышения качества процессов гигротермической обработки натуральных кож

В связи с тем, что интенсифицированные способы гигротермической обработки отличаются как по своей длительности, так и по характеру воздействия на физико-механические свойства заготовок верха обуви [63, 94], то необходимо тщательное изучение интенсифицированных процессов увлажнения, влажно-тепловой обработки и сушки при подаче тепла и влаги изнутри через перфорированную колодку и проведении перечисленных процессов без выемки в одной рабочей камере.

1.2.2. Технологии и оборудование для гигротермической обработки с использованием вакуума и их влияние на качество и эксплуатационные свойства кожевенно-обувных материалов

Наиболее эффективным, как следует из анализа существующих способов увлажнения заготовок верха обуви, с точки зрения интенсификации процесса и влияния на физико-механические свойства кожи, является вакуумно-сорбционный способ увлажнения. При сорбционном способе увлажнения применение вакуума позволяет резко интенсифицировать процесс введения влаги за счёт увеличения коэффициента внешней диффузии. Влияние коэффициента внешней диффузии на скорость сорбции влаги примерно в 100 раз больше величины коэффициента внутренней диффузии [100, 167]. При этом способе происходит и изменение механизма переноса влаги внутри материала с диффузионного на эффузионный [167], скорость которого значительно превосходит скорость диффузионного [75].

Разрушение водородных связей и образование новых связей между молекулами воды и гидрофильными группами структурных элементов кожи являются особенностью вакуумно-сорбционного увлажнения. Причём этот эффект проявляется в большей степени при малых парциальных давлениях паров воды. Некоторые молекулы воды, чаще всего сорбируемые микрокапиллярами в первый момент из пара при низком парциальном давлении, взаимодействуют с полярными группами, находящимися в молекулах выдубленного коллагена на поверхности структурных элементов кожи, образуют водородные связи и переходят в иммобилизованное состояние [111]. При таком способе увлажнения влага, сконденсированная только в микрокапиллярах ($r < 10^{-7}$ м), и оказывает существенное влияние на изменение физико-механических свойств кожи, характеризующих их формуемость и формоустойчивость [64] (табл. 1.2).

Таблица 1.2 – Изменение показателей физико-механических свойств кож хромового дубления в зависимости от способов увлажнения

Показатель	В воздушно-сухом состоянии	После увлажнения сорбционного	
		без вакуума	с вакуумом
Привес влаги		10±1,7	14±2
Удлинение при напряжении 10 МПа, % (полное)	15±0,7	16±1	21±1,3
Остаточное удлинение, %	4,5±0,3	3±0,2	8±0,3
Удлинение при разрыве, %	41±2,6	70±4,4	75±4,7
Нагрузка при разрыве, Н	295±18	277,5±17	227,5±14
Предел прочности при растяжении, МПа	22,5±1,5	23,7±1,5	21,5±1,4
Условный модуль упругости, МПа	109±7	78±5	59±3

Вакуумно-сорбционный способ позволяет резко интенсифицировать процесс введения влаги в материал, что особенно важно для кож повышенной толщины, для которых реализация только сорбционного способа увлажнения до нормируемого значения влажности требует значительного времени. Увлажнение материалов влажным насыщенным паром в условиях пониженного давления ускоряется в результате изменения механизма переноса пара внутри материала с диффузионного на эффузионный [111] и оказывает гарантированное воздействие на предварительно вакуумированные микрокапилляры кожи.

При этом можно предположить, что существует особый, характерный для вакуумно-сорбционного способа увлажнения механизм конденсации молекул пара, находящихся в разреженном состоянии, только в микрокапиллярах, соизмеримых с диаметром молекул пара. Время конденсации, с учётом максимально возможного заполнения микрокапиллярной структуры кожи, определит основной параметр оборудования для вакуумно-сорбционного способа увлажнения – производительность обработки.

Таким образом, на основе проведённого анализа выдвигается гипотеза о существовании при низких парциальном давлении и температуре избирательной конденсации пара в системе микрокапилляров кожи в условиях вакуума, способствующей интенсификации сорбции влаги в микрокапиллярах, образованию новых связей в структуре кожи, не разрушаемых при повтор-

ных воздействиях тепла и влаги, фиксации и сохранению её формы в новом зафиксированном состоянии при последующих интенсифицированных методах обработки.

Для сушки кожевенного полуфабриката в лёгкой промышленности применяются комбинированные способы сушки, одним из которых является вакуумная сушка с контактным способом подвода тепла. Длительность этого способа сушки зависит от температуры греющей плиты, степени вакуума, усилия прижатия материала к плите [162]. Но увеличение температуры греющей поверхности является причиной увеличения усадки материала по площади и толщине, повышения прочности, снижения удлинения и ухудшения гигиенических свойств полуфабриката.

Степень вакуума в камере способствует интенсивности сушки, и охлаждению материала в первом периоде. Так, при вакуумной сушке кожевенного полуфабриката в условиях остаточного давления 1,3 кПа температура материала в первом периоде составила 15 °С, длительность сушки – 5,0 мин. При давлении 7,5 кПа температура образца составила 35 °С, а длительность сушки – 7,5 мин. Температура греющей поверхности в обоих случаях равнялась 70 °С [167]. Снижение остаточного давления в вакуумной камере от 13 до 1,3 кПа приводит к сокращению длительности сушки с 11,5 до 5 мин. Изменение остаточного давления в камере мало влияет на структуру и свойства кожевенного полуфабриката.

Различная степень прижатия материала к греющей плите изменяет условия теплообмена и тем самым сказывается на скорости сушки. При слабом прижатии т между материалом и плитой появляются микрозазоры, играющие роль изолятора тепла. Кроме того, увеличение степени прижатия материала к плите снижает посадку и коробление материала. Увеличение давления, обеспечивающего прижатие кожевенного полуфабриката к греющей плите от 0 до 98 кПа, приводит к снижению длительности сушки с 8,5 до 5 мин. Этот параметр вакуумной сушки оказывает существенное влияние на структуру и свойства полуфабриката.

Увеличение силы механического прижатия способствует уплотнению структуры полуфабриката и образованию большого числа вторичных связей, приводит к повышению прочности, уменьшению удлинения и ухудшению гигиенических свойств кожи.

При производстве кож хромового дубления для верха обуви из сырья тяжёлых развесов разработан оптимальный режим вакуумной сушки, обеспечивающий наилучшие показатели качества: температура греющей поверхности 70–75 °С (в промышленности 90–95 °С), давление, обеспечивающее прижатие полуфабриката к греющей поверхности, составляет 29,4–49 кПа (в промышленности 90 кПа), остаточное давление в камере 6-7 кПа, продолжительность сушки равна 7,5 мин [4, 167].

В таблице 1.3 приведены относительные изменения показателей физико-механических свойств кожи при вакуумно-радиационной и радиационной сушке [4].

Таблица 1.3 – Изменения показателей физико-механических свойств кож хромового дубления после вакуумно-радиационной сушки относительно радиационной

Показатели	Относительное изменение показателей
Воздухопроницаемость	2,0
Паропроницаемость	0,6
Пароёмкость	0,5
Угол восстановления после изгиба	0,5
Коэффициент складкообразования	1,6
Критическое усилие продольного сжатия и изгиба	2,5
Температура сваривания	0,7
Устойчивость к многократному изгибу	0,8
Предел прочности при растяжении для образцов	1,6

Относительные изменения показателей свидетельствуют о ряде преимуществ вакуумно-радиационной сушки по сравнению с радиационной. Использование вакуума перспективно как для обычных видов обуви, так и для обуви с верхом из кож с повышенной толщиной и повышенным начальным влагосодержанием (например, специальной обуви с верхом из юфти).

Применение вакуума позволяет ускорить процесс сушки в несколько раз, по сравнению с радиационной сушкой, улучшая физико-механические свойства кожи [4, 167].

Оборудование для интенсифицированного гигротермического воздействия в вакууме [150] можно классифицировать по следующим признакам:

По принципу действия это оборудование можно подразделить на устройства периодического действия, работающие по циклу «загрузка – обработка – выгрузка», и устройства непрерывного действия, в которых эти элементы совмещены во времени и выполняются автоматически.

Последние установки применяются только в массовом производстве, устройства же периодического действия являются универсальными и находят применение во всех видах производства [136], в том числе и в единичном.

В зависимости от вида обрабатываемых заготовок различают установки для обработки их в плоском или объёмном виде. В плоском виде заготовки подвергаются в основном увлажнению, а в объёмном виде обрабатываются заготовки, находящиеся на колодках, при ВТО и сушке. Эти колодки могут быть перфорированными для осуществления воздействия на кожаные заготовки с бахтармянной, а не лицевой стороны [13, 114, 115, 118].

По способу подачи пара к заготовкам различают установки с подачей пара из парогенератора через систему трубопроводов и из ёмкости для получения пара, установленной внутри рабочей камеры [14, 150].

При последнем способе подачи пара изменение термодинамического состояния пара при поступлении его в рабочую зону непосредственно к заготовкам верха обуви не происходит.

По способу отвода конденсата существуют установки с естественным и принудительным способами отвода. Естественный способ реализуется в конструкциях установок, предусматривающих его отвод. Принудительно выводится конденсат из рабочей зоны в установках, снабжённых форсунками или вентиляторами.

Оборудование для интенсифицированного гигротермического воздействия в вакууме по технологическим возможностям подразделяется на специальное (для выполнения одной операции) и универсальное (для выполнения различных операций).

Так, для интенсифицированного вакуумно-сорбционного увлажнения применяется установка фирмы «Лотэс» (Англия) [150], состоящая из двух закрывающихся камер эллиптического поперечного сечения, смонтированных одна над другой в каркасе. Камеры герметически закрываются крышками. В задней части установки размещается парогенератор, в котором автоматически поддерживается постоянный уровень воды.

Каждая из камер соединена с вакуумным насосом трубопроводами через электромагнитные гидравлические клапаны, а с парогенератором – трубой с двумя ответвлениями. Каждое ответвление имеет клапан для регулирования поступления пара в увлажнительную камеру и клапаны для уравнивания давления в камерах с атмосферным после окончания процесса увлажнения.

Для интенсифицированной влажно-тепловой обработки затянутой на колодке обуви в вакууме известна установка проходного типа с ленточным вертикально замкнутым конвейером RSSV фирмы «Ринальди» [128, 150].

Конвейер установки пошагово перемещает затянутую на колодках обувь через зону увлажнения, далее – зону сушки и в конце обувь оказывается в зонах промежуточной сушки, охлаждения и, наконец, выходит из туннеля в зону выгрузки.

Колокол, опускаясь, плотно прижимается уплотнительным кольцом к ленте конвейера и плите, герметизируя обувь. В результате внутренняя полость колокола оказывается герметично изолированной, и в ней создаётся пониженное давление. Технологические режимы в каждой зоне поддерживаются автоматически.

Для интенсификации сушки применяется вакуумная сушилка «MAGIC 3» [167].

Для оценки энергоэффективности гигротермической установки применяется комплексный критерий. Оценку энергоэффективности производят в виде приведённых затрат на единицу продукции (кВт/час) с помощью следующего соотношения [102]:

$$\mathcal{E}_n = \frac{P}{\Pi}, \quad (1.1)$$

где P – установленная мощность оборудования, кВт;

Π – производительность, пар/час.

Если полученная величина меньше 0,07 кВт/час [102], то такая установка энергоэффективна.

Значения показателей энергоэффективности $\mathcal{E}_n$ для рассмотренных выше установок приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Значения показателей энергоэффективности оборудования для ИГО

Наименование установки	Установленная мощность оборудования, кВт	Производительность, пар/час.	Энергоэффективность, кВт/час
Устройство для вакуумно-сорбционного увлажнения фирмы «Лотэс»	3	50	0,06
«MAGIC 3» фирмы «Черан»	5	210	0,023
RSSV фирмы «Ринальди»	23,9	190	0,120/3=0,04

Анализ энергоэффективности рассмотренных выше установок показал, что приведённые энергозатраты на единицу продукции для специальных устройств, реализующих увлажнение и сушку и для универсальной установки RSSV проходного типа с учётом того, что на ней выполняются все три гигротермические операции, составляют менее 0,07 кВт/час [102], что подтверждает эффективность применения в них вакуума.

Таким образом, проведённый анализ технологий и оборудования для гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов с использованием вакуума выявил следующее:

1) гигротермическая обработка заготовок верха обуви, происходящая в условиях вакуума, способствует интенсификации процессов;

2) гигротермическая обработка строго дифференцирована в основном по операциям (за исключением установки проходного типа RSSV, реализующей последовательный метод обработки), каждая из которых проводится на своём специализированном оборудовании с применением традиционных для обувного производства колодок с подачей тепла и влаги с лицевой стороны заготовок;

3) качество гигротермической обработки после проведения соответствующих операций оценивается количеством введённой или удалённой влаги без учёта её влияния на изменение показателей физико-механических свойств кож, которое различно при традиционных и интенсифицированных способах обработки.

1.3. Краткий обзор математических моделей тепломассообменных, деформационно-релаксационных процессов и их взаимосвязей при гигротермической обработке кожевенно-обувных материалов

1.3.1. Система дифференциальных уравнений молярно-молекулярного тепломассопереноса

Между процессами, происходящими в материале (тепломассоперенос) и в пограничном слое теплоносителя (тепломассообмен), происходит тесная, но довольно сложная взаимосвязь [94, 100, 101, 165]. Изменение параметров тепломаассоносителя меняет условия массопереноса в капиллярно-пористом теле, а происходящие в нём изменения поровой структуры при усадке (сушке), фазовые и другие превращения влияют на пограничный слой и определяют интенсивность внешнего тепломассообмена.

Явления переноса энергии и вещества в капиллярно-пористой системе подчиняются общим закономерностям термодинамики необратимых процессов, особенностью которой является то, что при неравновесном состоянии

рассматриваемой системы состояния весьма малых её элементов можно считать равновесными (при очень быстро протекающих процессах) и применять к ним уравнения термодинамики, в целом же процесс рассматривается как неравновесный [100]. При этом пользуются феноменологическими законами, выражающими интенсивность теплового потока энергии j_t или массы j_m в виде произведения (принцип линейности Онзагера):

$$\vec{q} = \sum_1^n k_{ki} \cdot \vec{F}_i,$$

где $\vec{q}$ – интенсивность потока энергии;

$\vec{F}_i$ – термодинамическая сила, под действием которой происходит перенос массы или энергии внутри системы;

k_{ki} – кинетический коэффициент.

Учитывая, что перенос массы происходит в основном по двум причинам (наличие градиента массосодержания и градиента температуры), в выражение для плотности потока массы (влаги) подставляются обе термодинамические силы:

$$\vec{j}_m = \pm K_{mm} \times \vec{F}_m \pm K_{mt} \times \vec{F}_t, \quad (1.2)$$

где K_{mm} , K_{mt} – кинетические коэффициенты, представляющие собой проводимость потока влаги под действием соответствующих сил;

$\vec{F}_m$ – термодинамическая сила, вызывающая поток влаги за счёт градиента влагосодержания;

$\vec{F}_t$ – аналогичная сила, создающая поток влаги под действием градиента температуры.

Аналогично, для плотности потока тепла $\vec{j}_t$ имеем:

$$\vec{j}_t = \pm K_{tm} \times \vec{F}_m \pm K_{tt} \times \vec{F}_t. \quad (1.3)$$

В наиболее общем случае, при интенсивном нагреве, во влажном материале кроме градиента температуры ∇T и влагосодержания ∇U возникает градиент общего давления ∇P , под действием которого осуществляется мо-

лярный перенос пара. Поэтому закон переноса тепла и массы вещества в этом случае имеет вид [100]:

$$\begin{aligned}\vec{j}_t &= -\lambda_s \times \nabla T \pm I \times \vec{j}_m \\ \vec{j}_m &= \pm a_m \times \rho (\nabla U \pm \delta \times \nabla T) \pm \lambda_p \times \nabla P,\end{aligned}\quad (1.4)$$

где λ_s – эквивалентный коэффициент теплопроводности;

λ_p – коэффициент молярного переноса пара;

a_m – коэффициент диффузии влаги, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Натуральная кожа, применяемая при изготовлении заготовок верха обуви, относится к типичным коллоидным капиллярно-пористым телам [101], влага в которых может перемещаться в виде жидкости и пара.

А.В. Лыковым и Ю.Л. Кавказовым [49, 101] предложена следующая характеристика перемещения влаги в капиллярно-пористых телах:

- перемещение в микрокапиллярах;
- перемещение в макрокапиллярах;
- перемещение конденсированной влаги в капиллярах;
- перемещение в адсорбированном слое.

Так как изменение физико-механических свойств кожи происходит под действием микрокапиллярной влаги, то перенос влаги в микрокапиллярах, который может происходить в виде жидкости и пара, описывается уравнением:

$$\begin{aligned}j &= j_2 + j_1 = (-a_{2k} + k_{пл}) \cdot \rho_o \cdot \nabla u + k_{пл}^T \cdot \rho_o \cdot \nabla T - \\ &- a_{1s} \cdot \rho_o \cdot \nabla u - a_{1s}^T \cdot \rho_o \cdot \nabla T,\end{aligned}\quad (1.5)$$

где a_{2k} – коэффициент диффузии жидкости в коллоидном теле, отнесённый к разности влагосодержаний;

$k_{пл}$, $k_{пл}^T$ – коэффициенты соответственно изотермического и неизотермического плёночного движения жидкости;

ρ_o – плотность абсолютно сухого тела;

∇u , ∇T – градиенты соответственно влагосодержания и температуры;

a_{13} , a_{13}^T – коэффициенты соответственно эффузии и термической эффузии пара в пористом теле.

Первые два слагаемых приведённого уравнения характеризуют перенос жидкообразной влаги диффузионным путём (вязкое течение Пуазейля), а третье и четвёртое – перенос влаги в виде пара эффузией (Кнудсеновская диффузия).

Значения a_{13} , a_{13}^T соответственно равны:

$$\begin{aligned} a_{13} &= \frac{1}{\rho_0} \cdot 1,064 \cdot r_3 \cdot \sqrt{\frac{M_1}{R}} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_T, \\ a_{13}^T &= 1,064 \cdot r_3 \cdot \sqrt{\frac{M_1}{R}} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_u \cdot \frac{1}{\rho_0}, \end{aligned} \quad (1.6)$$

где r_3 – эквивалентный радиус молекулярного течения пара;

M_1 – молекулярная масса пара;

R – универсальная газовая постоянная.

$$\varphi_K = \frac{2\sigma}{\gamma_{ж}} \cdot \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right), \quad (1.7)$$

где φ_K – капиллярный потенциал;

σ – коэффициент поверхностного натяжения влаги;

$\gamma_{ж}$ – плотность влаги;

ρ_1 , ρ_2 – радиусы менисков конических капилляров.

Перемещение молекул воды в адсорбированном слое происходит практически на любой поверхности в микро- и макрокапиллярах, однако её роль наиболее заметно проявляется только в микрокапиллярах [2, 167].

В настоящее время нет единой теоретической концепции, основываясь на которую, можно было бы получить строгое количественное описание процесса увлажнения, но накоплен обширный материал [18, 30, 55, 173-175] и выдвинут ряд гипотез [111], объясняющих отдельные закономерности процесса: диффузия в газовой среде и поверхностное течение протекают параллельно, проницаемость пористых тел за счёт поверхностного течения возрас-

тает и, пройдя через максимум, резко падает, что объясняется частичным или полным заполнением пор, сконденсировавшимся паром; с уменьшением температуры резко увеличивается вклад поверхностного течения в процесс переноса. По мере адсорбции и конденсации газа на поверхности его плотность может изменяться на 4-5 порядков, в то время как при переходе из газовой в конденсированную фазу коэффициент диффузии молекул снижается минимально на 6 порядков [111].

Особенности влагопереноса в натуральной коже и многослойных полимерных системах изучались в ряде работ [49, 50], в которых установлено, что при атмосферном давлении механизм паропроницаемости для однослойных и многослойных образцов идентичен и реализуется в основном вязким течением Пуазейля, но, наряду с ним, в процессе переноса влаги участвует и молекулярный поток по Кнудсену, который при соответствующих условиях вместе с влагопереносом в адсорбированном слое эффективнее вязкого течения. Из приведённых выше уравнений и литературных данных следует, что скорость влагопереноса зависит от градиентов влагосодержания и температуры, а все другие термодинамические силы влагопереноса являются их функциями. При соответствующем построении процесса градиенты влагосодержания и температуры могут иметь одинаковые направления или противоположные, в первом случае они усиливают скорость движения влаги и ускоряют процесс, а во втором – один градиент тормозит действие другого.

Из анализа приведённых уравнений следует также, что на скорость процесса влагопереноса влияет и механизм переноса влаги. Так, эффузионный механизм переноса пара, скорость которого значительно превосходит скорость диффузионного, ускоряет процесс, что возможно в условиях вакуума.

1.3.2. Критериальные уравнения высокоинтенсивного тепломассопереноса

Моделирование процессов тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах при импульсно-вакуумной интенсификации приведено в работе [31],

основано на явлении переноса энергии и вещества и подчиняется общим закономерностям термодинамики необратимых процессов [100].

Аналитическая задача, устанавливающая связь между временными и пространственными изменениями потенциалов переноса, например при пропитке капиллярно-пористых материалов [31], формулируется на основе системы дифференциальных уравнений молярно-молекулярного тепломассопереноса, являющейся математической моделью процессов переноса при пропитке. В соответствии с [100, 101] в случае постоянных коэффициентов система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{dU}{d\tau} &= \pm a_m \times \nabla^2 U + a_m \times \delta \times \nabla^2 T + a_m \times \delta_p \times \nabla^2 P \\ \frac{dT}{d\tau} &= \pm \frac{E_\phi}{C} \times a_m \times \nabla^2 U + \left(a + \frac{E_\phi}{C} \times a_m \times \delta\right) \nabla^2 T + \frac{E_\phi r}{C} \times a_m \times \delta_p \times \nabla^2 P, \\ \frac{dP}{d\tau} &= \pm \frac{E_\phi}{C_p} \times a_m \times \nabla^2 U - \frac{E_\phi}{C_p} \times a_m \times \delta \times \nabla^2 T + \left(a_p - \frac{E_\phi}{C_p} \times a_m \times \delta_p\right) \nabla^2 P\end{aligned}\quad (1.8)$$

где δ_p – относительный коэффициент молярного потока вещества;

E_ϕ – критерий фазового превращения;

C – приведённая удельная теплоёмкость тела;

C_p – теплоёмкость влажного тела по отношению к веществу, участвующему в молярном переносе;

a_p – коэффициент молярной потенциалопроводности;

U – массосодержание, равное отношению массы связанного вещества (жидкости, пара и воздуха) к массе сухого тела;

δ_p – относительный коэффициент термодиффузии, K^{-1} .

E – критерий фазового перехода, который определяется как отношение изменения концентрации пропиточного состава к общему изменению концентрации вещества в порах. Из определения следует: $0 \leq E \leq 1$. Если перемещаемое вещество является жидкостью, то $E = 0$, если газом, то $E = 1$.

При выводе данной системы уравнений были сделаны допущения:

- температура связанного вещества равна температуре скелета тела;
- конвективный перенос – величина малая и ей можно пренебречь.

Отмечается, что решение этой, по существу, нелинейной системы наталкивается на значительные трудности, так как в литературе отсутствуют данные по целому ряду коэффициентов переноса [31].

Упрощённые критериальные уравнения, предложенные Ю. Михайловым [100] для описания и расчёта высокоинтенсивного тепломассопереноса, имеют вид:

$$\bar{T} = \bar{T}(Lu, Bi_g, Ko, Pn, A, Fo), \quad (1.9)$$

$$\bar{U} = \bar{U}(Lu, Bi_m, Ko, Pn, E, Fo), \quad (1.10)$$

$$\bar{P} = \bar{P}(Lu, Lu_p, Bu, Ko, Pn, E, Fo), \quad (1.11)$$

где

$$\bar{T} = \frac{\bar{t} - t_o}{t_c - t_o}; \quad \bar{U} = \frac{u_o - \bar{u}}{u_o - u_p}; \quad \bar{P} = \frac{p - p_o}{p_o} \quad (1.12)$$

соответственно безразмерные средние температура, потенциал массопереноса и давление.

В уравнение входят следующие критерии подобия:

$$Lu = \frac{a_p}{D} - \text{критерий Лыкова} \quad (1.13)$$

$$Bi_g = \frac{\alpha \cdot \ell}{\lambda} \text{ и } Bi_m = \frac{\alpha_o \cdot \ell}{\lambda_m} - \text{тепловой и массообменный критерий Био}; \quad (1.14)$$

$$Ko = \frac{r \cdot \Delta U}{c_B \cdot \Delta T} - \text{критерий Коссовича}; \quad (1.15)$$

$$Pn = \frac{\delta_p \cdot \Delta u}{\Delta p} - \text{критерий Поснова}; \quad (1.16)$$

$$Bu = \frac{r \cdot c_p \cdot \Delta p}{c \cdot \Delta T} - \text{критерий Булыгина}. \quad (1.17)$$

Общая система дифференциальных уравнений тепломассопереноса (1.8) не имеет решений, однако анализ этой системы с учётом уравнения кинетики рассматриваемого процесса позволил выделить три основных способа импульсно-вакуумной интенсификации процессов переноса вещества [31]:

- 1) увеличение разности потенциалов ($\Delta t, \Delta u, \Delta p$);
- 2) увеличение поверхности контактов материала с теплоносителем;

3) увеличение кинетических коэффициентов (коэффициентов диффузии, сушки, тепло- и массопереноса).

Критерий фазового перехода приравнивается к нулю, так как испарение в начальной стадии пропитки отсутствует и решение принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial \tau} = D \cdot \nabla^2 u + D \cdot \delta_p \cdot \nabla^2 p; \\ \frac{\partial p}{\partial \tau} = a_p \cdot \nabla^2 p. \end{cases} \quad (1.18)$$

Используя теорию подобия, переходят к безразмерной форме записи системы (1.18):

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial Fo} = \nabla^2 U + Pn \cdot \nabla^2 P; \\ \frac{\partial P}{\partial Fo} = Lu \cdot \nabla^2 P. \end{cases} \quad (1.19)$$

Таким образом система уравнений (1.19) описывает процесс пропитки капиллярно-пористого тела при изменении давления за промежуток времени $\tau + \Delta\tau$.

На основе вышеуказанных допущений переходят к одномерной форме записи (1.19):

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + Pn \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial X^2}; \\ \frac{\partial P}{\partial Fo} = Lu \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial X^2}. \end{cases} \quad (1.20)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (1.20) приводит к установлению связи между безразмерными величинами U и P :

$$\begin{cases} U(X, Fo) = \frac{Pn \cdot Pd \cdot Lu}{Lu^2 - 1} \cdot F(X, Fo) + 1; \\ P(X, Fo) = Pd \cdot F(X, Fo); \\ F(X, Fo) = Fo + \frac{1}{2} \cdot (X^2 + 1) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos \vartheta_m}{\vartheta^3 \cdot (-1)^{m+1}} \cdot \exp(-\vartheta_m^2 \cdot Fo). \end{cases} \quad (1.21)$$

где X – безразмерная координата,

Fo – критерий Фурье.

Таким образом, установлено, что между безразмерными величинами U и P существует определённая связь:

$$U = \frac{Pn \cdot Lu}{Lu^2 - 1} \cdot P + 1, U = k_{\text{с.в.}} + 1, \quad (1.22)$$

то есть для увеличения концентрации пропиточного состава необходимо увеличивать градиент давления и критерий Поснова, уменьшая число Лыкова.

Полученная зависимость (1.22) справедлива для относительно больших значений критерия Фурье. Более точная связь между безразмерными потенциалами относительной концентрации и давления, полученная впервые [31] и позволяющая задавать рациональные режимы пропитки и сушки, будет иметь следующий вид:

$$U(X, Fo) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot \cos(\mu_n \cdot X)}{\mu_n \cdot (-1)^{n+1}} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo) + \frac{Pn \cdot Lu}{Lu^2 - 1} \cdot P, \quad (1.23)$$

где μ_n – относительное число молекул перемещаемого вещества.

Проанализировав выражение (1.23), приходят к выводу, что пропитка с использованием импульсного (скоростного) изменения давления много эффективней обычной вакуумной пропитки и тем более пропитки окунанием.

Таким образом, предложенные Ю. Михайловым для описания и расчёта высокоинтенсивного тепломассопереноса упрощённые критериальные уравнения, содержащие различные критерии подобия, полученные с использованием теории подобия, установившие связи между рассматриваемыми параметрами и позволившими наметить пути интенсификации, не являются обобщёнными, пригодными для управления процессами и не обеспечили решение рассматриваемых дифференциальных уравнений.

1.3.3. Уравнения взаимосвязи тепломассообменных и деформационно-релаксационных процессов, протекающих при сушке дисперсных материалов

Натуральная кожа, по классификации акад. А.В. Лыкова, относится к коллоидным капиллярно-пористым телам, которые, обладая высокой гидрофильностью и термолабильностью, под воздействием тепла и влаги, существенно изменяют свои свойства, а также структурные и физико-

механические характеристики. Для установления связи между массообменными и релаксационно-деформационными процессами и физико-механическими свойствами натуральной кожи при её относительном деформировании в работах Р.В. Луцыка, Ю.Л. Ментковского [90–97,106] используется наследственная теория Больцмана – Вольтерры и первое и второе начала термодинамики для неравновесных процессов в открытых системах.

Уравнение, описывающее механические закономерности (ползучесть и релаксацию напряжений в коже), сводится авторами к эквивалентной краевой задаче Каши с вырождёнными ядрами (ползучести и релаксации) вида:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + L(t) \right] \cdot \varepsilon(t) = \left[\frac{\partial}{\partial t} + L(t) + \varepsilon(t) \right] \frac{\delta(t)}{E}, \quad (1.24)$$

при $\varepsilon(t_o) = \frac{\delta(t_o)}{E}$,

$\varepsilon(t)$ – текущее растяжение образца, равное $\frac{l(t_o) - l}{l_o}$ (l_o и $l(t)$ – начальный

и текущий размер образца);

$\eta(t)$ – коэффициент ползучести (вязкости);

$\delta(t)$ – напряжение в коже при одноосном растяжении МПа, равное $F(t) / S$,

где $F(t)$ – приложенная вдоль оси сила,

S – площадь поперечного сечения образца;

E – модуль упругости, МПа;

t – время, с.

Причём источником (ядром) при нахождении $\delta(t)$ считается левая часть уравнения (1), а при нахождении $\varepsilon(t)$ – правая часть.

Изменение физико-механических свойств под действием тепла и влаги при относительном растяжении кожи учитывают уравнением первого начала термодинамики:

$$\partial Q = \partial U + \partial A + r \partial m, \quad (1.25)$$

где Q – теплота, Дж;

U – внутренняя энергия, Дж;

A – работа, Дж;

r – удельная теплота испарения, Дж/кг;

m – масса, кг.

Анализируя уравнение (1.25), устанавливают, что изменение внутренней энергии ∂U обусловлено:

а) прогревом или охлаждением образца – $c_\varepsilon, \delta(t) (\partial t)$;

б) одноосным его деформированием – $V \cdot D(t) \varepsilon \partial \varepsilon$,

где $c_\varepsilon \delta(t)$ – теплоёмкость влажного тела при $\varepsilon = \text{const}$ и $\delta = \text{const}$; КДж/(кг•К);

V – объём тела, м³;

$D(t)$ – безразмерный коэффициент диссипации.

Работой расширения ∂A при малых растяжениях пренебрегают ($\partial A = 0$).

Удельная теплота испарения принимается изменяющейся величиной в связи с испарением свободной влаги $r(0)$, а затем связанной $r(t)$.

Конечное уравнение, после соответствующих преобразований приобретает вид:

$$C_{\varepsilon, \delta}(t) \frac{\partial(\Delta T)}{\partial t} + \alpha(t) \Delta T(t) = r(t) \frac{\partial m}{\partial t} - V \sigma \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - V D(t) \varepsilon \frac{\partial \sigma}{\partial t}. \quad (1.26)$$

И вместе с уравнением

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + L(t) \right] \varepsilon(t) = \left[\frac{\partial}{\partial t} + L(t) + \varepsilon(t) \right] \frac{\sigma(t)}{E} \quad (1.27)$$

при принятом начальном условии составляют систему уравнений, моделирующую связь релаксационно-деформационных и тепломассообменных процессов, протекающих в коже при её гигротермической обработке, полученных на основе совместного применения наследственной теории вязкоупругости Больцмана – Вольтерры и первого и второго законов термодинамики для открытых систем.

Поступающее в систему из окружающей среды количество теплоты ∂Q моделируется формулой Ньютона – Рихмана, воплощающей второе начало термодинамики о направлении потока теплоты от «тёплого» к «холодному»:

$$\partial Q = \alpha(t) [T_0 - T(t)] dt, \quad (1.28)$$

где $\alpha(t)$ – интегральный коэффициент теплообмена;

$T_0 = \text{const}$ – температура окружающей среды;

$T(t)$ – температура увлажняемого (высушиваемого тела), ОК.

На основе совместного применения наследственной теории вязкоупругости Больцмана – Вольтерры и первого и второго законов термодинамики для открытых систем полученная система уравнений позволяет определить любую пару из трёх величин: $\Delta T(t)$, $m(t)$, $\xi(t)$ по заданной третьей.

Рассмотренный теоретический подход к установлению взаимосвязи теплообменных и релаксационно-деформационных процессов позволяет рассчитывать и прогнозировать комплекс теплофизических, термодинамических и физико-механических характеристик дисперсных материалов, в том числе и натуральных кож, при силовом и температурно-влажностном воздействии на них в условиях малых растяжений – при одноосном деформировании материала. Такие растяжения преобладают при обтяжно-затяжном методе формования с применением клещей. При формовании вытяжной колодкой преобладающим является двухосное деформирование материалов, для которого полученные модели не могут быть использованы. Вместе с этим, в предложенной модели не учтён фактор времени, учитывающий физическую природу механизма тепломассообмена в условиях пониженного давления – вакуума и особенностей, происходящих при таком воздействии в структуре кожи.

1.3.4. Обоснование применения метода теории подобия функционирования технических систем для создания моделей взаимосвязи тепло-массообменных и релаксационно-деформационных процессов при интенсифицированной гигротермической обработке (ИГО) кожевенных материалов

Сложность математического описания интенсифицированных гигротермических процессов состоит в том, что эти процессы абсолютно далеки от термодинамического равновесия, а теория неравновесных термодинамических процессов недостаточно развита, и для описания их следует применять концепции квантовой физики и нанотехнологии [160].

Так, при вакуумно-сорбционном увлажнении кож хромового дубления, являющимся одним из интенсифицированных гигротермических процессов,

резко возрастает чувствительность микрокапилляров кожи, являющихся фактически наноконпонентами, к воздействующей среде – молекулам пара (диаметр молекулы пара равен 0,3 нм), получаемого в условиях вакуума. При этом показатели физико-механических свойств кожи значительно превосходят показатели кож, увлажнённых паром при нормальном атмосферном давлении. Таким образом, вакуумно-сорбционное увлажнение может быть, на наш взгляд, отнесено к нанотехнологиям, характерной особенностью которых является воздействие на объекты с размерами не более 100 нм (микрокапилляры кожи) частицами, имеющими такой же порядок размеров (молекулами пара). А так как классические законы физики остаются справедливыми для систем до 10 нм, то при меньших размерах возникают новые закономерности и для математического описания процессов требуются новые методы, к которым может быть отнесён метод подобия функционирования технических систем (ПФТС).

В классической теории подобия [7, 8, 20, 21, 54, 110] отсутствует понятие «подобие функционирования», но имеется понятие (и вид подобия) – «функциональное подобие».

Понятие «подобие функционирования систем» трактуется автором работы [123] как взаимнооднозначное соответствие выполнения системой-оригиналом сходственных с системой-аналогом выходных функций в условиях нестационарности внешних воздействий и внутренних параметров системы-оригинала, тождественность математических описаний которых (функций) устанавливается постоянством соответствующих критериев подобия функционирования.

Согласно работе [123] в качестве системы-аналога может выступать сама система-оригинал, но с идеальными, нормативными, исходными и т.п. составом и значениями параметров.

Критерий подобия функционирования – это безразмерный комплекс, устанавливающий нормативное значение соотношения выходной функции к совокупности параметров внешних воздействий и параметров внутренних процессов явления, системы. При этом в качестве системы-аналога может быть представлена система-оригинал с базовыми («идеальными», норматив-

ными, прогнозируемыми и т.д.) значениями и составом параметров функций [143].

Таким образом, понятие «подобие функционирования систем» отвечает на вопрос: «Какими должны быть внутренние процессы, реализуемые материальной системой, чтобы при определённых по составу и переменных, в общем случае, значениях входных (управляющих, возмущающих) воздействий и внутренних параметров системы получить или сохранить состав и область допустимых значений выходных параметров функционирования системы, характерных для системы-аналога?».

Обобщая приведённые выше рассуждения и выводы, автор работы [123] делает такой концептуальный вывод: понятие «подобие функционирования» является мировоззренческой категорией, позволяющей в практике человеческой деятельности исследовать явления, системы материального мира на различных этапах их существования, используя при этом объективные критерии качества функционирования аналогов. Методология же реализации этой концепции является содержанием метода подобия функционирования технических систем и, в частности, технических систем «техника–технология–продукция» при интенсифицированном гигротермическом воздействии.

В зависимости от задачи и этапа исследования подобия технического состояния систем критериальные модели могут быть детерминированными и стохастическими.

Детерминированные модели с использованием теории подобия и анализа размерностей получены в работах Ю.М. Шустова [169]. Они используются для прогнозирования механических свойств тканей с учётом таких показателей, как линейная плотность нитей по основе и утку, плотность нитей, вид переплетений, которые позволяют объективно оценивать и улучшать качество тканей.

Натуральные кожи, используемые при изготовлении верха обуви, обладают свойствами анизотропии в связи со спецификой их производства (выделки), разбросом параметров животных, из шкур которых эти кожи выделя-

ваются, а также большим количеством других случайных факторов. В связи с этим сложно предсказать заранее или свести к одному параметру свойства конкретного участка кожи, то есть любой количественный результат, который характеризует свойства конкретного образца кож, будет стохастическим (случайно сформированным) [38]. С учётом этих особенностей натуральных кож необходимо рассматривать стохастическое подобие функционирования технических систем с учётом возможного от аналога отклонения параметров обработки. Критерии стохастического подобия использовались в работах Н.А. Северцева, Г.А. Ярыгина [110, 139] для обеспечения надёжности систем при их проектировании и испытаниях; рассматривались в работах В.А. Першина [122] о стохастическом подобии функционирования технических систем, а модели, базирующиеся на таком подходе, могут быть положены в основу концепции по созданию унифицированного гигротермического оборудования, реализующего возможность совмещения технологических операций при интенсифицированной гигротермической обработке натуральных кожевенно-обувных материалов в условиях вакуума.

Таблица 1.6 – Анализ потенциала современных теорий по решению проблемы взаимосвязи тепломассообменных и релаксационно-деформационных процессов в коллоидных капиллярно-пористых телах

Теоретическая база	Разработчик	Взаимосвязь выходной характеристики и параметров функционирования системы	
		детерминированная	стохастическая
Система дифференциальных уравнений молярно-молекулярного переноса	А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов	+	-
Критериальные уравнения высокоинтенсивного тепломассопереноса	Ю.А. Михайлов	+	-
Уравнения взаимосвязи тепломассообменных и релаксационно-деформационных процессов	Р.В. Луцык	+	-
Метод теории подобия функционирования технических систем	В.А. Першин	+	-
Метод теории стохастического подобия функционирования технических систем	В.А. Першин	+	+

1.4. Цель задачи диссертационного исследования

Целью исследования является разработка методологии создания процессов и унифицированного оборудования для энергосберегающих технологий интенсифицированной обработки натуральных кожевенно-обувных материалов гигротермическим воздействием на их микроструктуру в условиях вакуума.

Для реализации поставленной цели определены следующие задачи:

- доказательство гипотезы о существовании в капиллярно-пористых телах при низких парциальном давлении и температуре в системе микрокапилляров кожи избирательной конденсации пара в условиях вакуума, способствующей интенсификации сорбции влаги в микрокапиллярах, образованию новых связей в структуре кожи, не разрушаемых при повторных воздействиях тепла и влаги, фиксации и сохранении её формы в новом зафиксированном состоянии при последующих интенсифицированных методах обработки;
- формирование концепции по созданию унифицированного гигротермического оборудования, реализующего возможность последовательно-параллельного совмещения технологических операций при интенсифицированной гигротермической обработке натуральных кожевенно-обувных материалов в условиях вакуума;
- разработка на основе теории случайных процессов аналитических выражений для функции распределения вероятности относительной влажности предварительно вакуумированных натуральных кожевенно-обувных материалов, позволяющих обосновать результаты экспериментальных исследований;
- формирование обобщённых моделей и критериев стохастического подобия функционирования процессов интенсифицированной гигротермической обработки, объединяющих показатели физико-механических свойств

обрабатываемых материалов с параметрами режимов их обработки и соответствующего оборудования, и последующая их практическая апробация;

– разработка методики использования критериев стохастического подобия функционирования процессов ИГО для расчёта показателей физико-механических свойств обрабатываемых материалов и показателей обработки, обеспечивающих требуемые показатели энергоэффективности и производительности оборудования;

– разработка структурных, функциональных, кинематических и принципиальных схем оборудования для интенсифицированного гигротермического воздействия на кожевенно-обувные материалы в условиях вакуума;

– практическая реализация способов интенсифицированного гигротермического воздействия при обработке натуральных кожевенно-обувных материалов на унифицированном оборудовании с использованием перфорированных колодок, обеспечивающих подачу тепла и влаги с бахтармянной стороны кожи;

– внедрение в производство рекомендаций по унификации оборудования для интенсифицированной гигротермической обработки с применением вакуума.

ВЫВОДЫ

1. Анализ научной информации в области интенсификации тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах позволил выдвинуть гипотезу о существовании при низких парциальном давлении и температуре избирательной конденсации пара в системе микрокапилляров кожи в условиях вакуума, способствующей интенсификации сорбции влаги в микрокапиллярах, образованию новых связей в структуре кожи, не разрушаемых при повторных воздействиях тепла и влаги, фиксации и сохранению её формы в новом зафиксированном состоянии при последующих интенсифицированных методах обработки.

2. Для дальнейшей интенсификации гигротермической обработки деталей обуви из натуральной кожи с целью гарантированного воздействия на её микрокапиллярную структуру и улучшения показателей физико-механических свойств при формовании и последующей носке обуви целесообразно осуществлять предварительное вакуумирование капилляров кожи и подачу пара с её бахтармянной стороны при совмещении ряда гигротермических операций.

3. Не установленная к настоящему времени взаимосвязь параметров ИГО и показателей физико-механических свойств обрабатываемых натуральных кожевенно-обувных материалов делает невозможным управление параметрами процессов, проводимых на соответствующем оборудовании.

4. Анализ работ, отражающих взаимосвязь тепломассообменных и деформационных процессов при гигротермической обработке материалов, показал, что предлагаемые рядом авторов громоздкие расчётные формулы содержат ряд достаточно сложно определяемых величин, затрудняющих пользование этими зависимостями на практике.

5. Показана целесообразность использования теории подобия функционирования технических систем для эффективного управления процессами ИГО натуральных кожевенно-обувных материалов, назначения научно обоснованных оптимальных технологических режимов для достижения требуемого качества обработки, проектирования нового энергосберегающего оборудования.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВАКУУМНО-СОРБЦИОННОГО УВЛАЖНЕНИЯ

2.1. Исследование интенсивности массопереноса в системе капилляров кожи в зависимости от фазового состояния влаги

Для доказательства положения гипотезы о существовании в капиллярно-пористых телах при низких парциальном давлении и температуре в системе микрокапилляров кожи избирательной конденсации пара в условиях вакуума, способствующей интенсификации сорбции влаги в микрокапиллярах, необходимо проанализировать особенности внешнего и внутреннего влагопереноса в этих условиях.

Для любой капиллярно-пористой системы [135], типичным представителем которой является кожа, влагоперенос может осуществляться различными способами: эффузией (молекулярный поток по Кнудсену), диффузией жидкообразной влаги (вязкий поток по Пуазейлю), переносом в адсорбционном слое (поверхностная диффузия, плёночное течение).

Вклад каждого из этих процессов в суммарный влагоперенос при вакуумно-сорбционном увлажнении, оценим, используя первый закон Фика [100]:

$$\Delta M = -D \frac{d\rho}{dx} \cdot \Delta S \cdot \Delta \tau, \quad (2.1)$$

где ΔM – масса компонента, которая переносится за время $\Delta \tau$ через элементарную площадку ΔS в направлении нормали x к рассматриваемой площадке в сторону убывания плотности;

$\frac{d\rho}{dx}$ – градиент плотности;

D – коэффициент диффузии.

Коэффициент диффузии в газовой среде согласно элементарной кинетической теории газов определим по формуле [171]:

$$D = \frac{1}{3} \bar{u} \cdot \bar{\lambda}, \quad (2.2)$$

где $\bar{u}$ – средняя скорость теплового движения молекул;

$\bar{\lambda}$ – средняя длина свободного пробега молекул.

Средняя длина свободного пробега молекул определяется по формуле [171]:

$$\bar{\lambda} = \frac{kT}{\pi \sqrt{2} \cdot d^2 \cdot p}, \quad (2.3)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

T – температура по Кельвину;

d – диаметр молекулы;

p – давление газа.

При $T=323\text{К} / 50\text{ }^{\circ}\text{C}/$ и соответствующем ей равновесном давлении паров воды $p = 12,3 \cdot 10^3$ Па величина средней длины свободного пробега молекулы воды диаметром $3,0 \cdot 10^{-10}$ м составит:

$$\bar{\lambda} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 323}{3,14 \sqrt{2} \cdot (3 \cdot 10^{-10})^2 \cdot 12,3 \cdot 10^3} = 0,906 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Среднюю скорость теплового движения молекулы воды определим по формуле [171]:

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \cdot \mu}} \approx 1,60 \sqrt{\frac{kT}{m}}, \quad (2.4)$$

где m – масса молекулы воды, равная $29,9 \cdot 10^{-27}$ кг.

$$\bar{u} = 1,60 \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 323}{29,9 \cdot 10^{-27}}} \approx 6,17 \cdot 10^2 \text{ м/с}$$

Коэффициент диффузии пара по формуле (2.2) составит:

$$D = \frac{1}{3} \cdot 6,17 \cdot 10^2 \cdot 0,906 \cdot 10^{-6} = 1,87 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$$

Коэффициент диффузии жидкообразной влаги определим по формуле:

$$D_1 = \frac{kT}{6\pi \cdot \eta \cdot d}, \quad (2.5)$$

где η – динамический коэффициент вязкости воды.

Для его вычисления используем формулу Пуазейля:

$$\eta = \eta_0 [1 + 0,0377 \cdot (T - 273K) + 0,000221 \cdot (T - 273K)^2]^{-1}, \quad (2.6)$$

где η_0 – величина динамического коэффициента вязкости (при $T=273\text{ K}$,

$$\eta_0 = 17,9 \cdot 10^{-4} \text{ Нс/м}^2).$$

Тогда при $T=323\text{ K}$ имеем:

$$\eta = 17,9 \cdot 10^{-4} [1 + 0,0377 \cdot 50 + 0,000221 \cdot 50^2]^{-1} = 5,21 \cdot 10^{-3} \text{ Нс/м}^2.$$

Коэффициент диффузии жидкообразной влаги D_1 составит:

$$D_1 = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 323}{6 \cdot 3,14 \cdot 5,21 \cdot 10^{-3} \cdot 3,0 \cdot 10^{-10}} = 1,51 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Сравнение величин $D_1 = 1,87 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ и $D_1 = 1,51 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ показывает, что интенсивность массопереноса влаги в газовой фазе на шесть порядков выше, чем в жидкой.

Таким образом, при моделировании процесса вакуумно-сорбционного увлажнения следует рассматривать влагоперенос по капиллярам кожи в газообразной фазе, как более эффективный.

2.2. Исследование интенсивности массопереноса в зависимости от изменения концентрации пара по длине капилляра в условиях вакуума

Представим, что в цилиндрической трубке длиной L в момент времени $\tau < 0$ нет молекул водяного пара и воздуха, и в момент времени $\tau = 0$ убирается перегородка между одним из оснований трубки и резервуаром, содержащим водяной пар.

Допустим, что объём резервуара много больше объёма трубки. Определим концентрацию водяного пара в трубке в момент времени $\tau > 0$, предполагая, что длина трубки намного больше её поперечных размеров. В этом случае задачу можно считать одномерной. Начало координат расположим на границе между трубкой и резервуаром с парами воды. Ось x направлена в трубку.

Процесс проникновения водяных паров в трубку в этом случае может быть описан уравнением диффузии [101]:

$$\frac{du}{d\tau} = D \frac{d^2 u}{dx^2}, \quad (2.7)$$

где $u(x, \tau)$ – концентрация паров воды, зависящая от расположения и времени.

На границе между резервуаром и трубкой, т.е. при $x=0$, концентрация паров в резервуаре равна u_o . Так как объём резервуара по принятому нами условию много больше объёма трубки, величину u_o можно считать постоянной.

Получаем граничное условие:

$$u(0, \tau) = u_o. \quad (2.8)$$

В другом конце трубки (при $x=L$) происходит отражение молекул воды (выполняется условие непроницаемости).

Математически это условие запишется в виде:

$$\left. \frac{du}{dx} \right|_{x=L} = 0. \quad (2.9)$$

Так как при $\tau = 0$ в трубке нет паров воды, то имеем:

$$u(x, 0) = 0, \quad (2.10)$$

где $0 \leq x \leq L$.

Решение уравнения (2.7) с краевыми условиями (2.8) и (2.9) и начальным условием (2.10) имеет вид:

$$u(x, \tau) = u_o - \frac{4u_o}{\pi} \cdot \sum_{K=0}^{\infty} \frac{1}{2K+1} \cdot e^{-\frac{(2K+1)^2 \pi^2 D \tau}{4L^2}} \cdot \sin \frac{(2K+1) \cdot \pi x}{2L}. \quad (2.11)$$

Остаток данного ряда оценивается по формуле [19]:

$$\left| R_n(x, \tau) \right| < \frac{2u_o \cdot e^{-A_n^2}}{\pi \cdot A_n^2}, \quad (2.12)$$

$$\text{где } A_n = \frac{(2n+1)\pi\sqrt{D\tau}}{2L}.$$

Из формулы (2.12) следует, что при малых τ в уравнении (2.11) нужно учитывать значительное число членов ряда, затем по мере возрастания τ их число можно уменьшить и, наконец, при больших значениях τ в ряде можно учитывать один-два члена, а затем при максимальном значении τ ряд становится практически равным нулю, а концентрация всюду равной u_0 .

При малых значениях τ вместо уравнения (2.11) удобнее воспользоваться решением, полученным в работе [159]:

$$u(x, \tau) = 2u_o \left[1 - \Phi\left(\frac{x}{\sqrt{2D\tau}}\right) + \Phi\left(\frac{x-2L}{\sqrt{2D\tau}}\right) \right], \quad (2.13)$$

здесь $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{\alpha^2}{2}} \cdot d\alpha$ – интеграл вероятностей.

Так, при $\tau < \tau_o = \frac{0,2L^2}{D}$ рекомендуется пользоваться уравнением (2.13), при $\tau \geq \tau_o$ – нижеприведённым уравнением:

$$u(x, \tau) = u_o - \frac{4u_o}{\pi} \cdot \left[e^{-\frac{\pi^2 D \tau}{4L^2}} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{2L} + \frac{1}{3} e^{-\frac{9\pi^2 D \tau}{4L^2}} \cdot \sin \frac{3\pi \cdot x}{2L} \right]. \quad (2.14)$$

Упростим уравнения (2.13) и (2.14) с помощью замены переменных:

$$C_1 = \frac{2D}{L^2}, \quad C_2 = \frac{x}{L}. \quad (2.15)$$

После преобразования уравнений (2.13) и (2.14) получаем:

$$\text{для } \tau < \tau_o \quad u(x, \tau) = 2u_o \left[1 - \Phi\left(\frac{C^2}{\sqrt{C_1}}\right) + \Phi\left(\frac{C_2 - 2}{\sqrt{C_1}}\right) \right], \quad (2.16)$$

для $\tau \geq \tau_o$

$$u(x, \tau) = u_o - \frac{4u_o}{\pi} \cdot \left[e^{-\frac{\pi^2 C_1}{8}} \cdot \sin \frac{\pi C_2}{2} + \frac{1}{3} \cdot e^{-\frac{9\pi^2 C_1}{8}} \cdot \sin \frac{3\pi \cdot C_2}{2} \right] \quad (2.17)$$

Как следует из анализа уравнений (2.16) и (2.17), концентрация является функцией только трёх переменных – u_0 , C_1 , C_2 , причём u_0 является просто множителем.

Поэтому концентрацию $u(x, \tau)$ можно выразить уравнением:

$$u(x, \tau) = u_0 \cdot f(C_1, C_2),$$

где $f(C_1, C_2)$ определяется либо уравнением (2.16), либо уравнением (2.17).

Из анализа функции $f(C_1, C_2)$, представленной в виде таблицы в работе [159], следует, что средняя концентрация паров воды в трубке, равная $u_0/2$, наступит через время τ :

$$\tau = 0,22 \frac{L^2}{D}, \quad (2.18)$$

а для создания 95 % концентрации паров воды в трубке потребуется время

$$\tau = 1,95 \frac{L^2}{D}. \quad (2.19)$$

Реальные капилляры кожи не являются цилиндрическими трубками, к тому же имеют малый диаметр, поэтому при анализе процесса диффузии в капиллярах необходимо учитывать малый размер их диаметров и извилистость.

Таким образом, как следует из формулы (2.2), коэффициент диффузии пропорционален средней длине свободного пробега молекул. Вблизи стенок капилляра, очевидно, средняя длина пробега молекул будет меньше, так как молекулы пара будут сталкиваться не только друг с другом, но и со стенками. Чем меньше диаметр капилляра, тем меньше средняя длина свободного пробега, а значит, и коэффициент диффузии.

Средний радиус капилляров кож хромового дубления составляет $2,48 \cdot 10^{-6}$ м [100]. Следовательно, средний диаметр примерно в пять раз больше средней длины пробега молекул пара $\bar{\lambda} = 0,906 \cdot 10^{-6}$ м, определённой при температуре $t = 50^\circ \text{C}$ и давлении $P = 12,3 \cdot 10^3$ Па. Поэтому для пор сред-

него радиуса и более коэффициент диффузии в поперечном направлении будет отличаться не более чем на 20 %. При движении молекул в продольном направлении уменьшение средней длины свободного пробега молекул, очевидно, ещё менее.

Несколько уменьшает коэффициент диффузии извилистость капилляров, так как молекулы чаще сталкиваются со стенками, но ввиду малой величины $\bar{\lambda}$ это влияние будет незначительно для пор среднего и большого радиусов. Извилистость капилляров для хромовых кож составляет 1,4–2,6 м/м.

Принимая продольный коэффициент диффузии в средних и широких капиллярах примерно таким же, как и вдали от стенок, определим время τ , за которое средняя концентрация пара в капилляре со средним значением коэффициента извилистости $\xi = 2,0$ м/м и толщиной кожи в 1,5 мм станет равной 95 % концентрации пара в резервуаре:

$$\tau = 1,95 \frac{(1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2)^2}{1,87 \cdot 10^{-4}} = 9,39 \cdot 10^{-2} \approx 10^{-1} \text{ с}.$$

Таким образом, в микрокапиллярах ($r < 10^{-7}$ м) средняя длина свободного пробега молекулы пара в поперечном направлении равна примерно диаметру капилляра, и в этом случае заполнение микрокапилляров происходит в течение нескольких секунд.

2.3. Исследование влияния капиллярно-сорбционного процесса конденсации пара в системе микрокапилляров кожи на интенсивность увлажнения в условиях вакуума

Капиллярная конденсация водяного пара происходит только в мелких капиллярах с эффективным радиусом $r < 10^{-7}$ м и даже в тех случаях, когда стенки капилляров гидрофобны [48]. Отсюда следует, что при вакуумно-сорбционном увлажнении привес влаги в коже происходит за счёт конденсации влаги в микрокапиллярах.

Для моделирования этого процесса представим капилляры кожи как цилиндрические трубки, длина каждой из которых значительно больше её диаметра, равного $2r_0$, где r_0 – радиус единичного капилляра.

Допустим, что в момент времени τ_0 начинается процесс переноса пара в трубку и его осаждение на стенках. Процесс конденсации пара можно считать равномерным, так как, во-первых, диффузия паров (как было выяснено выше) происходит очень быстро, (воздух из капилляров удалён при вакуумировании), а во-вторых, число сконденсировавшихся молекул пара зависит от первоначальной разности температур стенки, водяного пара и сил поверхностного натяжения, которые одинаковы по всей длине капилляра.

В связи с конденсацией пара на стенках, радиус части трубки, не занятой паром, будет уменьшаться. Изменение этого радиуса обозначим $r(\tau)$ и выясним, как он зависит от времени.

За время $\Delta\tau$ на стенках трубки сконденсируется масса влаги Δm , для которой справедливо выражение:

$$\Delta m = \Delta V \cdot \rho_v, \quad (2.20)$$

где ΔV – приращение объёма водяного слоя, м^3 ;

ρ_v – плотность воды, кг/м^3 .

Приращение объёма влаги ΔV равно:

$$\Delta V = 2\pi r \cdot \Delta r \cdot L, \quad (2.21)$$

где Δr – изменение радиуса трубки;

L – длина трубки

$$L = \xi \cdot l,$$

где l – расстояние между торцами трубки.

Масса Δm по закону Фика [100]:

$$\Delta m = -D \frac{d\rho_n}{dx} \cdot S(\tau) \cdot d\tau, \quad (2.22)$$

где $S(\tau)$ – площадь сечения трубки в момент времени $\Delta\tau$

$$S(\tau) = \pi[r(\tau)]^2,$$

где ρ_n – плотность пара.

Подставляя выражения (2.21) и (2.22) в (2.20), получим:

$$-D \frac{d\rho_n}{dx} \cdot \pi r^2 \cdot \Delta\tau = 2\pi r \cdot \Delta r \cdot L \cdot \rho_v \quad (2.23)$$

или
$$-D \frac{d\rho_n}{dx} \cdot r \cdot \Delta\tau = 2L \cdot \rho_v \cdot \Delta r. \quad (2.24)$$

Заменяв приращение дифференциалами, получим дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$-\frac{D \frac{d\rho_n}{dx}}{2L \cdot \rho_v} \cdot d\tau = \frac{dr}{r}. \quad (2.25)$$

Проинтегрировав выражение (2.25), получим:

$$\ln(r) = -\frac{D \frac{d\rho_n}{dx}}{2L \cdot \rho_v} \cdot \tau + C_1, \quad (2.26)$$

или
$$r(\tau) = C_1 \cdot e^{-\frac{D\rho'_n}{2L \cdot \rho_v} \cdot \tau}. \quad (2.27)$$

При $\tau = 0$ радиус равен r_0 , поэтому $C_1 = r_0$, а $\rho'_n = \rho'_n(0)$ – градиент концентрации пара на входе в капилляр, тогда

$$r(\tau) = r_0 \cdot e^{-\frac{D\rho'_n(0)}{2L \cdot \rho_v} \cdot \tau}. \quad (2.28)$$

Для определения объёма сконденсированной влаги в капиллярной трубке воспользуемся выражением:

$$\begin{aligned} V_{\text{вл}} &= V_{\text{тр.нач}} - V_{\text{тр.кон}} = \pi r_0^2 L - \pi r_0^2 \cdot \left(e^{-\frac{D\rho'_n(0) \cdot \tau}{2L \cdot \rho_v}} \right)^2 \cdot L = \\ &= \pi r_0^2 L \cdot \left(1 - e^{-\frac{D\rho'_n(0) \cdot \tau}{2L \cdot \rho_v}} \right)^2. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Для вычисления объёма влаги по формуле (2.29) необходимо знать значения D и $\rho'_n(0)$, которые зависят от давления и температуры пара.

Задав их средние значения, можно теоретически определить объём сконденсированной влаги. Средний градиент концентрации пара по длине трубки равен:

$$\frac{d\rho_n}{dx} = \frac{\rho_n}{x}. \quad (2.30)$$

Зависимости между средним градиентом концентрации пара и градиентом концентрации на входе в капилляр, установим, решив уравнение диффузии с поглощением [159]:

$$D \frac{d^2 \rho_n}{dx^2} - K_1 = 0, \quad (2.31)$$

где K_1 – масса пара, сконденсировавшегося за единицу времени на единице длины трубки.

Проинтегрировав дважды вышеприведённое уравнение, получим:

$$\rho_n = \frac{K_1}{2D} \cdot x^2 + C_1 x + C_2. \quad (2.32)$$

Для определения величин C_1 и C_2 воспользуемся начальными условиями:

$$\rho_n(0) = \rho_{n_o},$$

где ρ_{n_o} – плотность пара на входе в капилляр.

$$\left. \frac{d\rho_n}{dx} \right|_{x=L} = 0 \text{ – из условия непроницаемости.}$$

Следовательно,

$$C_2 = \rho_{n_o}, \quad C_1 = -\frac{K_1}{D} \cdot L$$

Подставляя найденные значения в уравнение (2.31), получим:

$$\rho_n = \frac{K_1}{2D} \cdot x^2 - \frac{K_1}{2D} \cdot x \cdot L + \rho_{n_o}. \quad (2.33)$$

Отсюда
$$\frac{d\rho_n}{dx} = \frac{K_1}{D} \cdot x - \frac{K_1}{D} \cdot L.$$

Тогда при $x=0$ имеем:

$$\left. \frac{d\rho_n}{dx} \right|_{x=0} = -\frac{K_1}{D} \cdot L.$$

Найдём средний градиент пара на отрезке $(0;L)$, используя формулу:

$$\left(\frac{d\rho_n}{dx} \right)_{\text{ср}} = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L \frac{d\rho_n}{dx} \cdot dx, \quad (2.34)$$

из которой имеем:

$$\left(\frac{d\rho_n}{dx} \right)_{\text{ср}} = \frac{1}{L} \cdot \left(\frac{K_1}{D} \cdot \frac{x^2}{2} - \frac{K_1}{D} \cdot L \cdot x \right) \Big|_0^L = \frac{1}{L} \cdot \left(\frac{K_1}{D} \cdot \frac{L}{2} - \frac{K_1}{D} \cdot L \cdot L \right) = -\frac{K_1 L}{2D}. \quad (2.35)$$

Найденная величина среднего градиента концентрации пара на отрезке $(0; L)$ в два раза меньше градиента в точке $x=0$.

Градиент концентрации пара на входе в капилляр:

$$\rho'_n(0) = \frac{d\rho_n}{dx}(0) = \frac{2\rho_n}{L}. \quad (2.36)$$

Подставив выражение (2.36) в уравнение (2.29), получим:

$$V_{\text{вл}} = \pi r_o^2 L \cdot \left(1 - e^{-\frac{2D\rho_n}{L^2 \cdot \rho_B} \cdot \tau} \right). \quad (2.37)$$

Уравнение (2.37) представляет собой выражение, позволяющее математически определить объём влаги, сконденсированной в коже, а по уравнению 2.38 определяется масса сконденсированной влаги:

$$m_c = \pi \cdot r_o^2 L \cdot \rho_B \cdot \left(1 - e^{-\frac{2D\rho_n}{L^2 \cdot \rho_B} \cdot \tau} \right), \quad (2.38)$$

Конденсация паров воды, как известно, может происходить только в микрокапиллярах, объём которых составляет в среднем 16,5 % [100] в кожах

хромового дубления. С учётом этого по уравнению (2.38) можно рассчитать теоретический привес влаги.

Среднее значение плотности пара можно вычислить, используя уравнение Клапейрона – Менделеева для разреженных газов:

$$p \cdot V = \frac{m}{\mu} RT . \quad (2.39)$$

Откуда плотность пара равна:

$$\rho_n = \frac{m}{V} = \frac{p\mu}{RT} , \quad (2.40)$$

где μ – молярная масса водяного пара, равная 18 кг/К моль;

R – универсальная газовая постоянная, равная $8,31 \cdot 10^3$ Дж/(моль К).

Результаты расчёта теоретического привеса влаги приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения теоретического привеса влаги в микрокапиллярах в зависимости от параметров и времени вакуумно-сорбционного увлажнения.

Основные параметры вакуумно-сорбционного увлажнения	Время увлажнения, с			
	120	240	360	480
Среднее значение давления, Па	$25 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$	$40 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$
Среднее значение температуры, °C	55	57	58	59
Среднее значение плотности пара, кг/м ³	$16 \cdot 10^{-2}$	$19 \cdot 10^{-2}$	$26 \cdot 10^{-2}$	$36 \cdot 10^{-2}$
Средняя скорость теплового движения молекул, м/с	$6,23 \cdot 10^2$	$6,24 \cdot 10^2$	$6,24 \cdot 10^2$	$6,26 \cdot 10^2$
Средняя длина свободного пробега молекул, м	$0,4 \cdot 10^{-6}$	$0,37 \cdot 10^{-6}$	$0,28 \cdot 10^{-6}$	$0,22 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент диффузии, м ² /с	$0,83 \cdot 10^{-4}$	$0,76 \cdot 10^{-4}$	$0,58 \cdot 10^{-4}$	$0,45 \cdot 10^{-4}$
Объём влаги, м ³	$3,51 \cdot 10^{-14}$	$5,25 \cdot 10^{-14}$	$5,84 \cdot 10^{-14}$	$6,09 \cdot 10^{-14}$
Теоретический привес влаги, %	9,5	13,5	15,3	16,0

Как видно из приведённых данных, с увеличением времени увлажнения интенсивность конденсации пара за счёт капиллярно-сорбционных явлений падает, что теоретически подтверждает положение гипотезы о существовании при низких парциальном давлении (от $25 \cdot 10^3$ до $40 \cdot 10^3$ Па) и температуре (от 55 до 58 °C) избирательной конденсации влаги в начальный период увлажнения (от 120 до 360 секунд).

2.4. Исследование интенсивности капиллярной конденсации пара в системе капилляров в условиях вакуума за счёт теплообмена

Теплообмен между кожей, имеющей начальную температуру T_n , и нагретым паром, обеспечивает его конденсацию, что и вызывает увеличение массы кожи за счёт прироста в ней влаги.

Зависимость удельной теплоёмкости воды и парообразования от температуры в первом приближении является линейной [171]. Для нахождения зависимости между температурой кожи и количеством сконденсировавшейся в ней влаги в результате теплообмена, без учёта капиллярно-сорбционных процессов, составим дифференциальное уравнение процесса.

Если за время Δt в коже массой M_k произошла конденсация пара массой Δm , то при этом коже передано количество тепла Δq :

$$\Delta q = \Delta m \cdot C_n(T), \quad (2.41)$$

где C_n – удельная теплоёмкость парообразования.

За время Δt температура кожи и уже сконденсированной влаги повысится на ΔT :

$$\Delta q = (M_k \cdot C_k + m \cdot C_b) \Delta T, \quad (2.42)$$

где C_k – удельная теплоёмкость кожи;

C_b – удельная теплоёмкость воды.

Приравняв правые части уравнений (2.41) и (2.42), получим дифференциальное уравнение:

$$\Delta m \cdot C_n(T) = (M_k \cdot C_k + m \cdot C_b) \Delta T. \quad (2.43)$$

Заменив приращения масс и температуры дифференциалами и разделяя переменные, получим:

$$\frac{dm}{M_k \cdot C_k + m \cdot C_b} = \frac{dT}{C_n(T)}. \quad (2.44)$$

Решим полученное уравнение относительно m :

$$\frac{1}{C_B} \cdot \ln |M_K \cdot C_K + m \cdot C_B| = \int \frac{dT}{C_n(T)} + C_1, \quad (2.45)$$

$$M_K \cdot C_K + m \cdot C_B = C_1 \cdot e^{C_B \int \frac{dT}{C_n(T)}} \quad (2.46)$$

или

$$m = \frac{1}{C_B} \cdot \left(C_1 \cdot e^{C_B \int \frac{dT}{C_n(T)}} - M_K \cdot C_K \right). \quad (2.47)$$

Приняв, что теплоёмкость парообразования в интервале температур от 20 до 80 °С изменяется линейно [171], то получим:

$$\int \frac{dT}{C_n(T)} = \int \frac{dT}{a + \epsilon T} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \ln |a + \epsilon T|. \quad (2.48)$$

Тогда

$$e^{C_B \int \frac{dT}{C_n(T)}} = e^{\frac{C_B}{\epsilon} \ln |a + \epsilon T|} = (a + \epsilon T)^{\frac{C_B}{\epsilon}}. \quad (2.49)$$

Следовательно,

$$m(T) = \frac{1}{C_B} \left[(a + \epsilon T)^{\frac{C_B}{\epsilon}} - M_K \cdot C_K \right]. \quad (2.50)$$

Рассмотрим частный случай, когда $C_n(T) = a = const$.

Тогда получим:

$$\ln |M_K \cdot C_K + m \cdot C_B| = \frac{C_B}{a} T + C_1. \quad (2.51)$$

или

$$m = \frac{1}{C_B} \left(C_1 \cdot e^{\frac{C_B}{a} T} - M_K \cdot C_K \right). \quad (2.52)$$

Найдём постоянную C_1 из начального условия

$$m(T_H) = 0. \quad (2.53)$$

Тогда

$$C_1 \cdot e^{\frac{C_B T_H}{a}} = M_K \cdot C_K. \quad (2.54)$$

Отсюда

$$C_1 = \frac{M_{\kappa} \cdot C_{\kappa}}{e^{\frac{C_B T_H}{a}}}. \quad (2.55)$$

Окончательно получим:

$$m(T) = \frac{1}{C_B} \left(\frac{M_{\kappa} \cdot C_{\kappa}}{e^{\frac{C_B T_H}{a}}} \cdot e^{\frac{C_B T}{a}} - M_{\kappa} \cdot C_{\kappa} \right). \quad (2.56)$$

или

$$m(T) = \frac{M_{\kappa} \cdot C_{\kappa}}{C_B} \left(e^{\frac{C_B}{a}(T - T_H)} - 1 \right). \quad (2.57)$$

Задавшись средней удельной теплотой парообразования при 50 °С, равной 2382 кДж/кг [133], теплоёмкостью воды, равной 4,19 кДж/(кг К), и подставив их значения в уравнение (2.56), получим:

$$m(T) = \frac{M_{\kappa} \cdot C_{\kappa}}{4,19} \cdot \left(e^{\frac{4,19}{2382} \cdot (T - T_H)} - 1 \right). \quad (2.58)$$

Разделив обе части уравнения (2.58) на M_{κ} , т.е. рассматривая влажность кожи как отношение массы влаги m к массе кожи M_{κ} до увлажнения, получим:

$$\frac{m}{M_{\kappa}} = \frac{C_{\kappa}}{4,19} \cdot \left(e^{0,00176 \cdot (T - T_H)} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (2.59)$$

откуда:

$$m = M_{\kappa} \cdot \frac{C_{\kappa}}{4,19} \cdot \left[e^{0,00176 \cdot (T - T_H)} - 1 \right] \cdot 100\% \quad (2.60)$$

Задавшись удельной теплоёмкостью кожи C_{κ} , равной 1,61 кДж/(кг К), получим численные значения привеса влаги в коже в зависимости от температуры, представленные в таблице 2.2

Таблица 2.2 – Теоретические значения привеса влаги в коже в зависимости от температуры

Характеристика	Температура, °С						
Привес влаги, %	20 0	30 0,7	40 1,3	50 2,1	60 2,8	70 3,6	80 4,3

Таким образом, теоретический привес влаги в коже при вакуумно-сорбционном увлажнении может быть рассчитан как сумма привесов влаги, полученных в результате капиллярно-сорбционных явлений и теплообмена [74].

Численные значения этих величин, полученных теоретически, приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Значения суммарного теоретического привеса влаги в коже в зависимости от времени вакуумно-сорбционного увлажнения

Показатели привеса	Время увлажнения, с			
	120	240	360	480
Теоретический привес влаги при капиллярно-сорбционных процессах, %	9,5	13,5	15,3	16,0
Теоретический привес влаги в результате теплообмена, %	2,5	2,6	2,7	2,8
Теоретический суммарный привес влаги, %	12,0	16,1	18,0	18,8

Таким образом, на основе анализа механизмов влагопереноса в капиллярно-пористых системах можно сделать предположение о реализации при вакуумно-сорбционном увлажнении, по крайней мере, двух процессов: капиллярной конденсации в результате сорбционных явлений и конденсации, обусловленной теплообменом между кожей и паром, интенсивность которых с увеличением времени увлажнения падает, что является подтверждением положения гипотезы об особенностях процесса вакуумно-сорбционного увлажнения в условиях вакуума.

С учётом этого полученные аналитические выражения для теоретического определения объёма сконденсированной влаги в результате капиллярно-сорбционных процессов и теплообмена, подтверждённые в дальнейшем экспериментально, могут считаться математическими моделями процесса конденсации влаги в микрокапиллярах кожи в условиях вакуума.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа механизма влагопереноса в капиллярно-пористых телах показано, что при вакуумно-сорбционном увлажнении можно выделить два этапа: нормальная Фиковская диффузия, при которой заполняется свободный объём полимера, включая микрокапилляры, и капиллярная конденсация пара только в микрокапиллярах кожи.

2. В результате решения уравнения диффузии установлено время заполнения микрокапилляра кожи паром в условиях вакуума, составившее несколько секунд и определяемое выражением: $\tau = 1,95L^2/D$.

3. На основе анализа процесса конденсации пара в результате сорбционных явлений в микрокапиллярах в условиях вакуума и решения уравнения диффузии с поглощением получено аналитическое выражение:

$$m_c = \pi \cdot r_0^2 L \cdot \rho_v \cdot \left(1 - e^{-\frac{2D\rho_v \tau}{L^2 \cdot \rho_v}} \right),$$

позволившее математически определить массу влаги, сконденсированной в микрокапилляре кожи за счёт сорбционных явлений.

4. Решением дифференциального уравнения теплообмена между паром и кожей в условиях вакуума без учёта сорбционных явлений является выражение:

$$m = M_k \cdot \frac{C_k}{4,19} \cdot [e^{0,00176 \cdot (T - T_n)} - 1] \cdot 100\%,$$

позволившее математически определить массу влаги, сконденсированной в микрокапилляре кожи за счёт теплообмена.

5. Полученные аналитические выражения для теоретического определения привеса влаги в коже при вакуумно-сорбционном увлажнении как суммы привесов влаги, полученных в результате капиллярно-сорбционных явлений и теплообмена, теоретически подтвердили положение гипотезы о существовании при низких парциальном давлении и температуре избирательной конденсации пара в системе микрокапилляров кожи в условиях вакуума, способствующей интенсификации сорбции влаги в микрокапиллярах и при экспериментальном подтверждении могут считаться математическими моделями процесса конденсации влаги в микрокапиллярах кожи в условиях вакуума.

ГЛАВА 3. МИКРОКАПИЛЛЯРНАЯ СТРУКТУРА КОЖИ КАК ОБЪЕКТ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОЙ ГИГРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВАКУУМА

3.1. Влияние структуры кожи на её деформационные свойства и относительную влажность

Для теоретического описания стохастических (случайно сформированных) свойств кожи, как подчёркивается К.Н. Замарашкиным [38], целесообразно использовать параметры (оценки), имеющие стохастическую (вероятностную) природу. Предпосылками к поиску статистических оценок, по его мнению, являются: иерархия структурных единиц кожи (микрофибриллы–фибриллы–волокна–пучки волокон), углы сплетения пучков волокон, их извилистость, пористость. Исходя из этого, кожа рассматривается в работах [38, 144, 145] как фрактальный объект, признаками которого являются: самоподобие (повторяемость структуры), выделенный масштаб, хаотичность структурных элементов, и доказывається применение к количественной оценке деформационных свойств кожи величины фрактальной размерности [39] в виде показателя степени хаотичности, спутанности волокон и пучков волокон. Среднее значение этого показателя для выделанной кожи по данным, полученным в исследованиях [38], составляет 1,62. Показано, что фрактальная размерность не зависит от ориентации образца и незначительно зависит от топографии шкуры. Другим показателем, на наш взгляд, характеризующим кожу как фрактальный объект, может быть её микрокапиллярная пористость.

Как известно из работ В.А. Кутыина, А.Е.Зельдиной, В.С. Набокова [40, 59], различия в пористой структуре кожевенного полуфабриката, связанные с неодинаковым строением дермы шкур разных видов животных и теми изменениями, которые она претерпевает в процессе выделки кожи, сказываются в основном на содержании влаги намокания и капиллярной влаги. Структура

же микропор (микрокапилляров) по топографическим участкам существенно не изменяется.

С другой стороны, разные по своей природе вещества, используемые при дублении кож (соли хрома, таниды и др.), оказывают неодинаковое влияние на капиллярно-пористую структуру коллагена [164], особенно на уровне фибрилл и протофибрилл, расстояния между которыми по классификации Р.В. Луцыка [94] относятся к микропорам (микрокапиллярам), заполняющимся влагой путём сорбции.

Так как процессы интенсифицированной гигротермической обработки связаны с заполнением (удалением) влаги из микропор, то для определения их объёма используется интегральная функция $F(r,0)$ [33]. Эта зависимость устанавливает зависимость между долей пористости, приходящейся на поры с радиусом меньше текущего, и текущим радиусом r и её производная по радиусу r , называемая дифференциальной функцией распределения пор по размерам $f(r) = dF(r)/dr$. Функция $f(r)$ характеризует плотность распределения объёма пор по размерам. Суммарный объём пор Π (пористость) интересующего нас размера (микрокапилляров) в единице объёма будет равен: $\Pi = V_{\max} = \int_{r_0}^{r_{\max}} f(r) dr$.

Таким образом, во второй главе теоретически доказано, что при интенсифицированных (быстротекущих) гигротермических процессах максимально возможный привес влаги достигается за счёт конденсации пара в предварительно вакуумированных микрокапиллярах [64] в результате сорбционных явлений и теплообмена между паром и кожей, а относительная влажность кожи, определяемая массой влаги, сконденсированной в микрокапиллярах, может отличаться от значений 26...30 %, рекомендуемых типовой технологией [152] изготовления обуви. Так, по данным, приведённым в работе Р.В. Луцыка [94], для полукожника хромового вида дубления влага микрокапилляров составляет от 22 до 27 %, а для юфти термоустойчивой – от 16 до 21 %. В связи с этим, очевидно, при интенсифицированном гигротермическом воздействии возникает необходимость рассматривать разброс показателей отно-

сительной влажности кожи, обусловленной микрокапиллярной пористостью Π при экспериментальных исследованиях, как неотъемлемую часть явления и изучать его природу более детально. Природа наблюдаемого разброса должна поэтому анализироваться статистическими методами с целью последующего использования результатов для основанного на статистических выводах о тренде и рассеянии предсказания относительно предстоящих испытаний.

3.2. Физико-статистические модели распределения микрокапилляров в структуре кож

3.2.1. Модель равномерного распределения микрокапилляров в структуре материала образца натуральной кожи

Пусть дано измеримое по Риману [104] тело D в пространстве (или измеримая фигура на плоскости, или отрезок на прямой) и множество микрокапилляров в рассматриваемом пространстве удовлетворяет равномерному закону распределения.

Рассмотрим событие A – на теле D микрокапилляры присутствуют, событие B – на теле G присутствуют микрокапилляры.

Пусть также тела D и G не имеют общих точек в пространстве и выбираются наудачу, тогда события A и B – несовместны.

Рассмотрим событие C – микрокапилляры присутствуют на теле $D \cup G$. Вероятность появления события C равна $P(C) = P(A + B)$. Тогда противоположное событие $\bar{C}$ – микрокапилляры отсутствуют на теле $D \cup G$. Вероятность появления события $\bar{C}$ равна:

$$P(\bar{C}) = P(\overline{A + B}) = P(\bar{A} \cap \bar{B}) = P(\bar{A}) \cdot P(\bar{B}). \quad (3.1)$$

Из (1) следует равенство:

$$P(\overline{A + B}) = (1 - P(A)) \cdot P(\bar{B}). \quad (3.2)$$

Пусть теперь тело может менять свои границы, соответственно будет изменяться и $P(A)$.

Продифференцируем по переменной $P(A)$ обе части уравнения (3.2):

$$\frac{dP(\overline{A+B})}{dP(A)} = -P(\overline{B}). \quad (3.3)$$

Разделив обе части уравнения (3.3) на соответствующие части уравнения (3.2), получим:

$$\frac{dP(\overline{A+B})}{P(\overline{A+B})} = -\frac{dP(A)}{1-P(A)}. \quad (3.4)$$

Так как множество микрокапилляров удовлетворяет равномерному закону распределения, то вероятность появления события A пропорциональна объёму тела D , это свойство аналогично выполняется для остальных рассматриваемых событий. Так как равенство (3.4) справедливо для произвольного измеримого события B , то

$$-\frac{dP(A)}{1-P(A)} = -cdV, \quad (3.5)$$

где $V = V(D)$ – объём тела D , $c = \text{const}$.

Интегрирование уравнения (3.5) приводит к равенству

$$1 - P(A) = e^{-cV}. \quad (3.6)$$

В силу равномерного закона распределения можем записать, что

$$P(A) = P_1(V),$$

соответственно уравнение (3.6) примет вид:

$$1 - P_1(V) = e^{-cV}. \quad (3.7)$$

Значение произвольной постоянной c определяется по правилу:

$$c = \frac{1}{\bar{V}}, \quad (3.8)$$

где $\bar{V}$ – средний объём, который занимают микрокапилляры в теле D .

Величина c означает среднюю концентрацию микрокапилляров и имеет размерность $\frac{1}{V}$. Соответственно, чем больше концентрация микрокапилляров, тем быстрее возрастает функция $P_1(V)$ с ростом V :

$$P_1(V) = 1 - e^{-\frac{V}{\bar{V}}}. \quad (3.9)$$

Из формулы (3.9) следует, что при постоянной концентрации микрокапилляров вероятность увлажнения быстро растёт с увеличением объёма. С другой стороны, для обеспечения равного увлажнения различных частей

тела средняя концентрация микрокапилляров должна резко снижаться с увеличением объёма V .

Уравнение (3.9) имеет общий характер и не зависит от допущений относительно физической природы микрокапилляров, поскольку оно было получено на основе лишь соображений теории вероятностей. Его вывод основывался на допущении, что появление всего одного микрокапилляра в теле D приводит к увлажнению.

Можно, однако, обобщить это допущение, введя критическое минимальное число микрокапилляров $n > 1$, которые необходимы для того, чтобы произошло увлажнение. Из формулы (3.6) следует, что $P(\bar{A}) = e^{-\frac{V}{\bar{V}}}$ и при малом числе микрокапилляров событие $\bar{A}$ – редкое.

Воспользуемся законом появления k раз редкого событий в n независимых испытаниях (законом Пуассона)

$$P_n(k) = \frac{1}{k!} \left(\frac{V}{\bar{V}} \right)^k e^{-\frac{V}{\bar{V}}}. \quad (3.10)$$

Если вероятность увлажнения равна вероятности появления не менее n микрокапилляров, то вероятность неувлажнения тела равна вероятности появления менее n микрокапилляров, или

$$1 - P_1(V) = e^{-\frac{V}{\bar{V}}} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{V}{\bar{V}} \right)^k, \quad (3.11)$$

соответственно

$$P_1(V) = e^{-\frac{V}{\bar{V}}} \sum_{k=n}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(\frac{V}{\bar{V}} \right)^k. \quad (3.12)$$

Введя интегральное и факториальное определения гамма-функции и неполной гамма-функции, уравнение (3.12) можно переписать в виде:

$$P_F(V) = 1 - [\Gamma(n+1) - \Gamma(cV, n+1)] / \Gamma(n+1) = I(cV, n), \quad (3.13)$$

где $c = \bar{V}^{-1}$, а отношение, выражающееся через неполную гамма-функцию $I(V/\bar{V}, n)$, затабулировано [188]; это отношение заключено между нулём и единицей и подобно любой другой функции распределения возрастает с ростом $V/\bar{V}$.

Таким образом, основной статистический аспект увлажнения при ИГО, состоящий в увеличении вероятности заполнения микрокапилляров с ростом объёма рассматриваемого образца, вытекает из чисто вероятностных рассуждений, исходя из допущения, что интенсифицированное гигротермическое воздействие при увлажнении обусловлено критическим числом микрокапилляров в элементарном объёме образца натуральной кожи.

3.2.2. Модель с наименьшим числом микрокапилляров в структуре материала образца натуральной кожи

Вторая модель – статистическая задача о наименьшем количестве микрокапилляров в элементарном объёме образца натуральной кожи – в точности эквивалентна задаче о распределении наименьших значений в выборке размера n . Если увлажнение большого образца определяется влажностью его наименьшего элемента объёма, то статистическое распределение влажности в целом получается как распределение наименьших влажностей в макрообразцах, состоящих из n элементов объёма.

Вероятность того, что в некоторой выборке размера n все значения непрерывной случайной величины X , имеющей функцию распределения $F(x)$, меньше, чем x , может быть истолкована как вероятность $\Phi_n(x)$ того, что x представляет собой наибольшее из этих значений. Поскольку $F(x)$ равно вероятности $\Pr\{X < x\}$, из правила умножения следует, что

$$\Phi_n(x) = [F(x)]^n. \quad (3.14)$$

Отсюда видно, что вероятность того, что определённое значение $X = x$ представляет собой наибольшее значение, уменьшается с ростом размера выборки n , так как функции $\Phi_n(x)$ для возрастающих n сдвигаются в сторону больших значений x , не пересекаясь.

Вероятность того, что все значения в выборке размера n больше чем x , может быть истолкована как вероятность того, что x является наименьшим из этих значений, или

$$1 - \Phi_1(x) = [1 - F(x)]^n, \quad (3.15)$$

и поэтому

$$\Phi_1(x) = 1 - [1 - F(x)]^n. \quad (3.16)$$

Формулы (3.14) и (3.16) определяют функции распределения наибольших и наименьших значений в выборках размера n через начальную функцию распределения $F(x)$. Соответствующие плотности вероятности равны

$$\varphi_n(x) = nF^{n-1}(x)f(x) \quad (3.17)$$

и

$$\varphi_1(x) = n[1 - F(x)]^{n-1}f(x). \quad (3.18)$$

Существование моментов у распределений экстремальных значений зависит, очевидно, от существования соответствующих моментов у начального распределения. Эти моменты существуют или не существуют одновременно.

Если они существуют, то имеют вид

$$m_{nk} = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k \varphi_n(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k d\Phi_n(x), \quad (3.19)$$

$$m_{1k} = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k \varphi_1(x) dx = - \int_{-\infty}^{+\infty} x^k d\Phi_1(x).$$

Для большинства начальных распределений эти выражения не могут быть проинтегрированы в замкнутой форме даже при $k=1$ (среднее значение).

Для того чтобы решить уравнение (3.14), рассмотрим m выборок размера n каждая. В каждой выборке имеется одно наибольшее значение. Наибольшее значение из mn наблюдений равно наибольшему из m наибольших значений, полученных для выборок размера n . Распределение наибольших значений из mn наблюдений будет стремиться к тому же самому асимптотическому распределению, что и распределение наибольших значений в выборках размера n , при условии, что это последнее существует.

Две функции распределения имеют один и тот же вид, если они связаны линейным преобразованием. Таким образом, вероятность того, что наибольшее значение меньше x , можно положить равной линейной функции от x вида

$$F^n(x) = F(a_n x), \quad (3.20)$$

где $a_n \neq 1$.

Из этого соотношения должен находиться параметр a_n как функция n , а также функция $F(x)$. Сравнивая выражения

$$[F^n(x)]^m = [F(a_n x)]^m = F(a_n a_m x) \quad (3.21)$$

и

$$[F^n(x)]^m = F^{nm}(x) = F(a_{nm} x), \quad (3.22)$$

получаем

$$a_{nm} = a_n a_m; \quad (3.23)$$

это будет выполняться, если взять

$$a_n = n^k,$$

где k – некоторая постоянная. Дважды последовательно логарифмируя равенство (3.20) и учитывая формулу (3.23), получаем следующее соотношение:

$$\ln n + \ln[-\ln F(x)] = \ln[-\ln F(n^k x)]. \quad (3.24)$$

Таким образом, если x увеличивается на $a_n = k \ln n$, то $\ln[-\ln F(x)]$ увеличивается на $\ln n$, так что

$$\ln[-\ln F(x)] - (\ln x)/k = \text{const}, \quad (3.25)$$

или

$$\ln[-\ln F(x)] = (\ln x - \ln u)/k, \quad (3.26)$$

и поэтому

$$-\ln F(x) = (x/u)^{1/k}, \text{ или } F(x) = \exp[-(x/u)^{1/k}], \quad (3.27)$$

где u получается преобразованием постоянной в формуле (3.25). Если случайная переменная неотрицательна, так что $F(0) = 0$, то отсюда следует, что k отрицательно:

$$1/k = -\alpha, \text{ где } \alpha > 0, \quad (3.28)$$

так что $F(\infty) = 1$, и поэтому формула (3.27) преобразуется в формулу Фреше [172], т.е. в асимптотическую функцию распределения наибольших значений.

Функциональное соотношение (3.19) приводит к равенству:

$$\Phi_n(x) = F^n(x) = \exp[1 - n(x/u)^{-\alpha}] = \exp[-(x/un^{1/\alpha})^{-\alpha}], \quad (3.29)$$

из которого следует, что если u обозначает объём наименьшего капилляра, отвечающего моде в элементах объёма V_0 , то объём микрокапилляров, отвечающий моде во всём объёме $V = nV_0$, равен $u(V/V_0)^{1/\alpha}$; множитель $(V/V_0)^{1/\alpha}$ выражает влияние увеличения объёма на влажность, обусловленную объёмом микрокапилляров в нём.

Зависящее от объёма распределение общей влажности непосредственно следует из уравнения (3.29):

$$F_n(z) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{k^2}{z^2 un^{1/\alpha}}\right)^{-\alpha}\right] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{z}{vn^{-1/(2\alpha)}}\right)^{2\alpha}\right] = 1 - \exp\left[-\frac{V}{V_0}\left(\frac{z}{v}\right)^{2\alpha}\right], \quad (3.30)$$

в котором модальная влажность снижается от v до $vn^{-1/(2\alpha)}$, или от локального значения σ_u до зависящего от объёма значения для образца в целом $\sigma_u(V/V_0)^{-1/(2\alpha)}$.

Моменты асимптотических распределений наименьших значений легко получаются интегрированием второго из выражений (3.24) по положительному интервалу изменения случайной переменной с использованием интегрального определения гамма-функции:

$$m_{1k} = -\int_0^\infty (z/v)^k d\exp[-(z/v)^{2\alpha}] = v^k \Gamma(1 + k/(2\alpha)), \quad (3.31)$$

откуда при $k=1$ получается среднее значение $m_{11} = \bar{z}$, определённое выражением

$$\bar{z} = v\Gamma(1 + 1/(2\alpha)), \quad (3.32)$$

которое сходится с ростом α к v . Дисперсия при этом равна

$$\sigma_z^2 = v^2[\Gamma(1 + 1/\alpha) - \Gamma^2(1 + 1/(2\alpha))]. \quad (3.33)$$

Дисперсия по отношению к нулевому среднему $\sigma^2 = m_{12} - m_{11}^2$ определена соотношением (3.33). Для распределения (3.30) выражение для моментов совпадает с формулой (3.31), в которой v заменено на $(vn^{-1/(2\alpha)})$. Следовательно,

$$m_{1k} = (vn^{-1/(2\alpha)})^k \Gamma(1 + k/(2\alpha)), \quad (3.34)$$

и поэтому при $k=1$

$$\bar{z}_1 = (vn^{-1/(2\alpha)})\Gamma(1+1/(2\alpha)) = \bar{zn}^{-1/(2\alpha)} \quad (3.35)$$

и

$$\sigma_1^2 = v^2 n^{-1/\alpha} \Gamma(1+1/\alpha) - v^2 n^{-1/\alpha} \Gamma^2(1+1/(2\alpha)) = \sigma^2 n^{-1/\alpha}. \quad (3.36)$$

Подставляя в эти формулы $n = V/V_0$, их можно записать так:

$$\bar{z}_1 / \bar{z} = \sigma_1 / \sigma = (V/V_0)^{-1/(2\alpha)}; \quad (3.37)$$

поэтому коэффициент изменчивости равен

$$\frac{\sigma_1}{\bar{z}_1} = \frac{\sigma}{\bar{z}} = \left[\frac{\Gamma(1+1/\alpha) - \Gamma^2(1+1/(2\alpha))}{\Gamma^2(1+1/(2\alpha))} \right]^{1/2}. \quad (3.38)$$

Таким образом, и средняя общая влажность, и её среднеквадратичное отклонение уменьшаются с ростом объёма, а коэффициент изменчивости от объёма не зависит.

Для $\alpha = \infty$ имеем $\bar{z} = \bar{z}_1 = v = \sigma_u$ и $\sigma^2 = \sigma_1^2 = 0$; общая влажность не зависит от объёма образца и однозначно определяется длиной микрокапилляра $2c = 2u$, следовательно, она равна σ_u . Поэтому величина статистической дисперсии общей влажности, как видно из таблицы 3.1, в которой приведены значения отношения $\sigma/\bar{z}$, вычисленные по формуле (3.38), обратно пропорциональна 2α . Чем меньше параметр 2α , тем больше дисперсия общей влажности и тем отчетливее выражена зависимость средней или модальной влажности и её среднеквадратичного отклонения от объёма образца.

Таблица 3.1 – Значения отношения $\sigma/\bar{z}$

$2\alpha:$	1	2	3	4	6	8	10
$\sigma/\bar{z}:$	1,0	0,46	0,33	0,25	0,18	0,14	0,11

В первом приближении коэффициент изменчивости $\sigma/\bar{z} \sim 1/(2\alpha)$. Наблюдаемые типичные значения $2\alpha = m$ изменяются между m от 1 до 2 для волокон [172].

Таким образом, анализ распределения значений относительной влажности кож не может быть выполнен, исходя из рассмотрения статистических

указаний, основанных на экспериментальных результатах, а должен делаться на основе принятия определённой физической модели процесса, приводящей к данной частной функции распределения значений. В случае реализации технологии вакуумно-сорбционного увлажнения [64], наилучший прогноз результатов и наиболее надёжную основу для экстраполяции даёт закон гамма-распределения полученных значений, связанный с моделью равномерного распределения микрокапилляров в структуре материалов.

3.3. Методика экспериментальной проверки разработанной модели равномерного распределения микрокапилляров в структуре материалов

Для экспериментального подтверждения принятой модели равномерного распределения микрокапилляров в структуре материалов необходима разработка методики проведения экспериментов по вакуумно-сорбционному увлажнению кож хромового дубления различной толщины и выделки: додубленные синтетическими дубителями (синтанами) типа БНС и наполненные полимером МХ-30. Кинетика сорбционного увлажнения таких кож представлена на рисунке 3.1 [43].

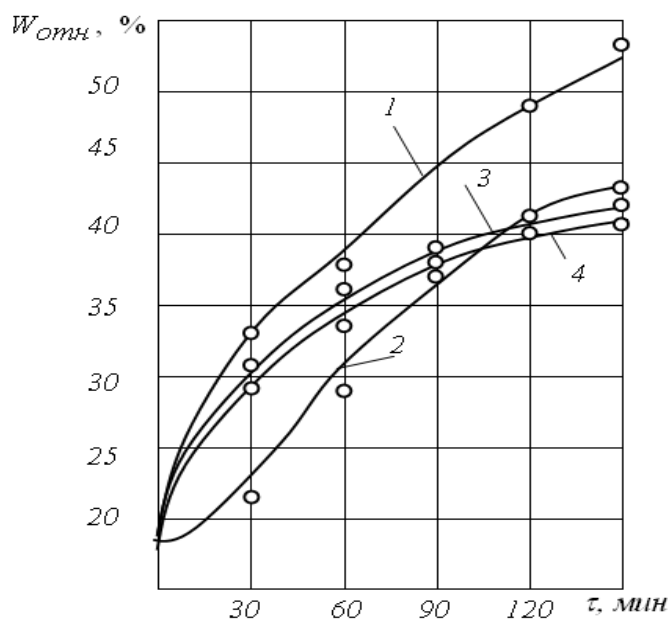


Рис. 3.1. Кинетика сорбционного увлажнения кож хромового дубления в зависимости от характера выработки:

1 – додубленная БНС; 2 – наполненная МХ-30; 3 – додубленная БНС и наполненная МХ-30;
4 – хромового дубления без додубливания и наполнения

Как видно из рисунка 3.1, существенное отличие в значениях относительной влажности образцов кож, увлажнённых сорбционным способом, связано с длительным диффузионным механизмом влагопереноса, при котором происходит медленное нарастание относительной влажности кожи по мере продвижения влаги под действием градиента влажности не только по капиллярам, но и сквозь их стенки. Причём при додубливании кож синтанами (БНС), независимо от их химической природы, увеличивается степень объёмного поглощения воды при капиллярном всасывании, в особенности в начальный момент процесса. При наполнении кожи полимерами (МХ-30) эффект увлажнения снижается.

В случае вакуумно-сорбционного увлажнения при эффузионном переносе влаги в виде пара, можно предположить, что относительная влажность кож хромового дубления различной выработки будет одинаковой. Это объясняется тем, что предварительное вакуумирование капилляров кожи исключает влияние изменения степени гидрофильности их поверхности на перемещение паров воды.

Полученные экспериментально показатели относительной влажности кож хромового дубления различной выработки после вакуумно-сорбционного увлажнения, подчиняющиеся закону гамма-распределения, будут являться подтверждением модели равномерного распределения микрокапилляров в структуре материалов. Для получения меры отклонения полученных экспериментальных данных от ожидаемых, согласно гипотетическому распределению, используется величина χ^2 [161]. Критерием проверки гипотезы о равномерном распределении микрокапилляров в структуре кожи может служить сопоставление величины равномерного распределения микрокапилляров в структуре материалов χ^2 с табличным значением, которое соответствует 100%-му уровню значимости. Для этого весь диапазон значений x_i для заданной выборки разбивается на n неперекрывающихся интервалов так, чтобы в каждом интервале оказывалось больше 10 значений, равных v_i .

Если p_i обозначает гипотетическую вероятность того, что x принимает значение, относящееся к i -му интервалу, то

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(v_i - np_i)^2}{np_i}. \quad (3.39)$$

Если $\chi^2 < \chi^2_p$, то гипотеза верна.

Значение χ^2_p как функция вероятности p и числа степеней ν определяется по соответствующей таблице [161].

ВЫВОДЫ

1. Показано, что анализ распределения значений относительной влажности кож не может быть выполнен исходя из рассмотрения статистических указаний, основанных на экспериментальных результатах, а должен делаться на основе принятия определённой физической модели, учитывающей распределение в структуре полимера, приводящей к данной частной функции распределения значений относительной влажности кож.

2. На основе двух физико-статистических моделей исследуемого процесса (модели равномерного распределения микрокапилляров и модели с наименьшим числом микрокапилляров в структуре материала образца) с помощью статистических методов получены аналитические выражения функции распределения относительной влажности, позволяющие прогнозировать поведение обрабатываемых материалов и эффективность технологий при ИГО.

3. Показано, что в случае реализации технологий ИГО наилучшее представление результатов испытаний и наиболее надёжную основу для экстраполяции даёт закон гамма-распределения полученных значений, связанный с моделью равномерного распределения микрокапилляров в структуре материалов.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОЙ ГИГРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ ВАКУУМА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАТУРАЛЬНЫХ КОЖ

4.1. Цель и задачи исследований

С целью экспериментального подтверждения положений гипотезы о существовании при низких парциальном давлении и температуре избирательной конденсации пара в системе микрокапилляров, равномерно распределённых в структуре образцов, способствующей: 1) интенсификации сорбции влаги в микрокапиллярах; 2) образованию новых связей в структуре кожи, не разрушаемых при повторных воздействиях тепла и влаги; 3) фиксации и сохранению формы в новом зафиксированном состоянии при последующих интенсифицированных методах обработки, необходимо решить сформулированные ниже задачи:

1. Разработка принципиальной схемы установки для вакуумно-сорбционного увлажнения, исключающей конденсацию влаги на поверхности образцов и обеспечивающую условия для переноса пара эффузией в микрокапиллярах кожи и её последующую конденсацию в них. Минимально возможные значения параметров процесса, способствующие его интенсификации, должны соответствовать теоретически установленным в математической модели, разработанной во второй главе диссертационного исследования, тем самым подтверждая адекватность модели.

2. Экспериментальная проверка модели, теоретически обоснованной в третьей главе диссертационного исследования, о распределении микрокапилляров в структуре кожи.

3. Экспериментальное исследование влияния режимов гигротермического воздействия после вакуумно-сорбционного увлажнения на изменение показателей физико-механических свойств кож хромового дубления и систем материалов.

4. Экспериментальное подтверждение гипотезы о возможном совмещении гигротермических операций при выполнении их в условиях вакуума на перфорированном пуансоне и сравнительная оценка результатов испытаний на формоустойчивость после интенсифицированной гигротермической обработки с применением традиционных и перфорированных колодок (пуансонов).

4.1.1. Объекты экспериментальных исследований

Объектами исследований являлись процессы и экспериментальные установки для вакуумно-сорбционного увлажнения и интенсифицированной гигротермической обработки.

При проведении экспериментальных исследований использовались кожи хромового дубления для верха обуви толщиной 0,95–1,6 мм, а также системы материалов, имитирующие пакет деталей верха обуви и включающий деталь верха из кожи хромового дубления, межподкладку (бязь) и подкладку (тик-саржу). Соединение материалов в системах производилось дублированием клеем НК, причём подкладка и межподкладка выкраивались из соответствующих материалов по диагонали [131, 132].

При проведении экспериментальных исследований для доказательства гипотезы о равномерном распределении микрокапилляров в структуре кожи дополнительно использовались кожи хромового дубления с эмульсионным покрытием, изготовленные из шкур бычины методом чередующихся половинок на Таганрогском кожевенном заводе по типовой технологии различной толщины (0,95–1,6 мм) и выделки:

- кожа хромового дубления, не додубленная синтанами (синтетическими дубителями) и не наполненная полимерами;
- кожа хромового дубления, додубленная синтаном БНС с расходом 5 % от массы строганных кож, считая на дубящие;
- кожа хромового дубления, наполненная полимером МХ-30 с расходом 5 %, считая на сухой остаток полимера;
- кожа хромового дубления, наполненная полимером МХ-30 с расходом 2,5 %, считая на сухой остаток полимера и додубленная синтаном БНС с расходом 2,5 %, считая на дубящие.

Образцы кожи выкраивались методом асимметрической бахромы [42, 109] и приводились к стандартному воздушно-сухому состоянию путём выдержки в эксикаторе, заполненным серной кислотой плотностью 1,27 г/см³. Для обеспечения меньшего рассеивания разброса показателей и, учитывая, что наиболее трудно формуемая деталь верха – союзка, образцы выкраивались из чепрачной части кожи шириной 20 мм и длиной 100 мм. Относительная влажность образцов после вакуумно-сорбционного увлажнения определялась по формуле:

$$W = [100(g_2 - g_1) + g_2 W_0] / g_1, \quad (4.1)$$

где W_0 – начальная равновесная влажность;

g_1, g_2 – масса образца до и после увлажнения.

Масса образцов до и после увлажнения измерялась на электронных весах с точностью до 0,01 грамма.

4.1.2. Методика статистической обработки данных

Число опытов N при проведении экспериментов определялось по формуле [153]:

$$N = P^k,$$

где P – число уровней,

k – число факторов.

В качестве факторов, учитываемых при проведении экспериментов по вакуумно-сорбционному увлажнению образцов хромового дубления, выкроенных из чепрачной части кожи при разработке принципиальной схемы установки, были выбраны время увлажнения и температура предварительного нагрева воды в парогенераторе. Каждый из факторов варьировался на 4-х уровнях. Время увлажнения составляло 2, 4, 6, 8 минут в соответствии с теоретическими моделями, полученными во второй главе. Температура предварительного нагрева воды в парогенераторе составляла 60, 70, 80, 90 °С. Таким образом, число опытов N составило:

$$N = 4^2 = 16.$$

Для получения точности всех проводимых экспериментов порядка 5 % количество образцов в каждом опыте составляло 10 штук. Результаты расчётов по каждой выборке усреднялись.

Все значения показателей, полученные в результате экспериментов по пунктам 1, 2, 4, 5, подвергались статистической обработке [155, 157]. Показатели статистической обработки экспериментальных данных приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Показатели статистической обработки экспериментальных данных

№ п/п	Наименование показателя	Обозначение	Формула, по которой определяется показатель	Примечание
1	Среднее арифметическое	$\bar{x}$	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$	n – число измерений
2	Среднеквадратичное отклонение	S	$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$	
3	Коэффициент вариации	V	$V = \frac{S}{\bar{x}} \times 100$	
4	Ошибка выборочной средней	$m_{\bar{x}}$	$m_{\bar{x}} = t_{\beta} \frac{S}{\sqrt{n}}$	t_{β} – критерий Стьюдента при доверительной вероятности
5	Доверительный интервал	I_{β}	$I_{\beta} = (\bar{x} \pm t_{\beta} \frac{S}{\sqrt{n}})$	

Методика статистической обработки экспериментальных данных по пункту 3 приведена далее в разделе 4.4.

4.1.3. Экспериментальная установка для исследования влияния способов подачи пара на относительную влажность кож хромового дубления и систем материалов

Лабораторный стенд для исследования кинетики вакуумно-сорбционного увлажнения представляет собой камеру объёмом 0,09 м³ с герметично закрывающейся крышкой, соединённую через золотник управления,

лагофильтр с вакуумным насосом (тип 2НВР-5ДМ, производительность 5 л/с, диапазон давления на входе от атмосферного до 0,02 МПа, мощность электродвигателя 0,55 кВт). Для выравнивания давления с атмосферным камера снабжена клапаном напуска воздуха. Для поддержания температуры рабочей среды внутри камеры в ней установлен трубчатый электронагреватель (ТЭН) мощностью 1 кВт. Напряжение, подаваемое на ТЭН, регулировалось схемой электропитания стенда. Подача влаги к образцам в камере при исследовании процессов увлажнения осуществлялась двумя способами:

– соединением вакуумированной камеры через впускной клапан с отдельным бачком – парогенератором, в котором находилась вода, нагретая в разных опытах до различных температур (рис. 4.1);

– испарением подогретой воды с открытой поверхности ёмкости с водой, установленной в камере (рис. 4.2).

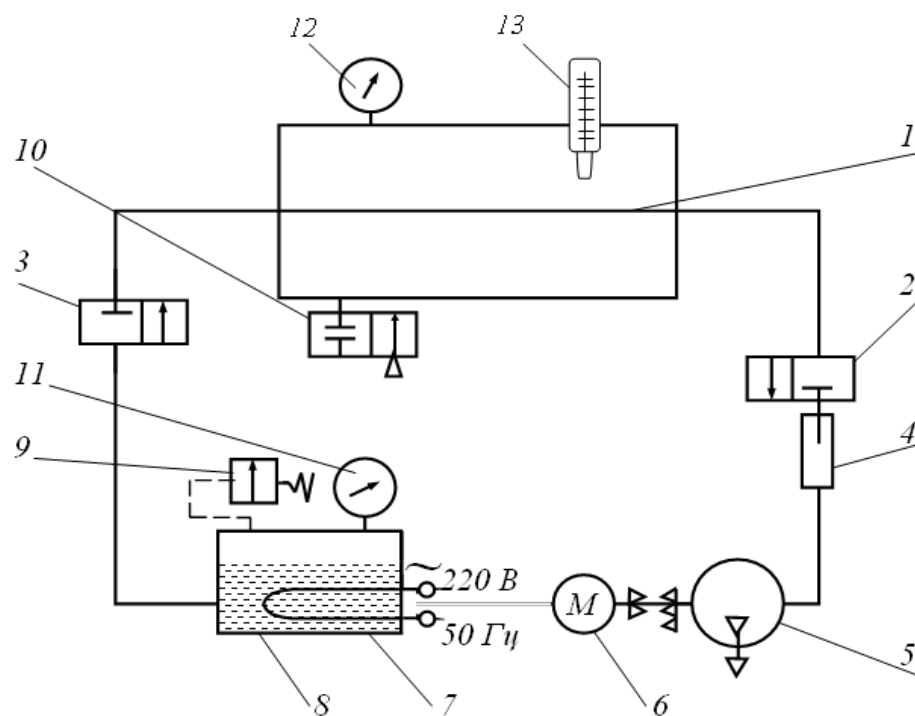


Рис. 4.1. Принципиальная схема установки для вакуумно-сорбционного увлажнения с парогенератором вне камеры:

- 1 – камера увлажнительная вакуумная; 2 – вентиль запорный проходной;
- 3 – вентиль для впуска пара; 4 – ловушка для улавливания конденсата;
- 5 – вакуумный насос; 6 – электродвигатель; 7 – электронагреватель; 8 – парогенератор;
- 9 – клапан предохранительный; 10 – вентиль для впуска воздуха; 11 – манометр;
- 12 – вакуумметр; 13 – термометр

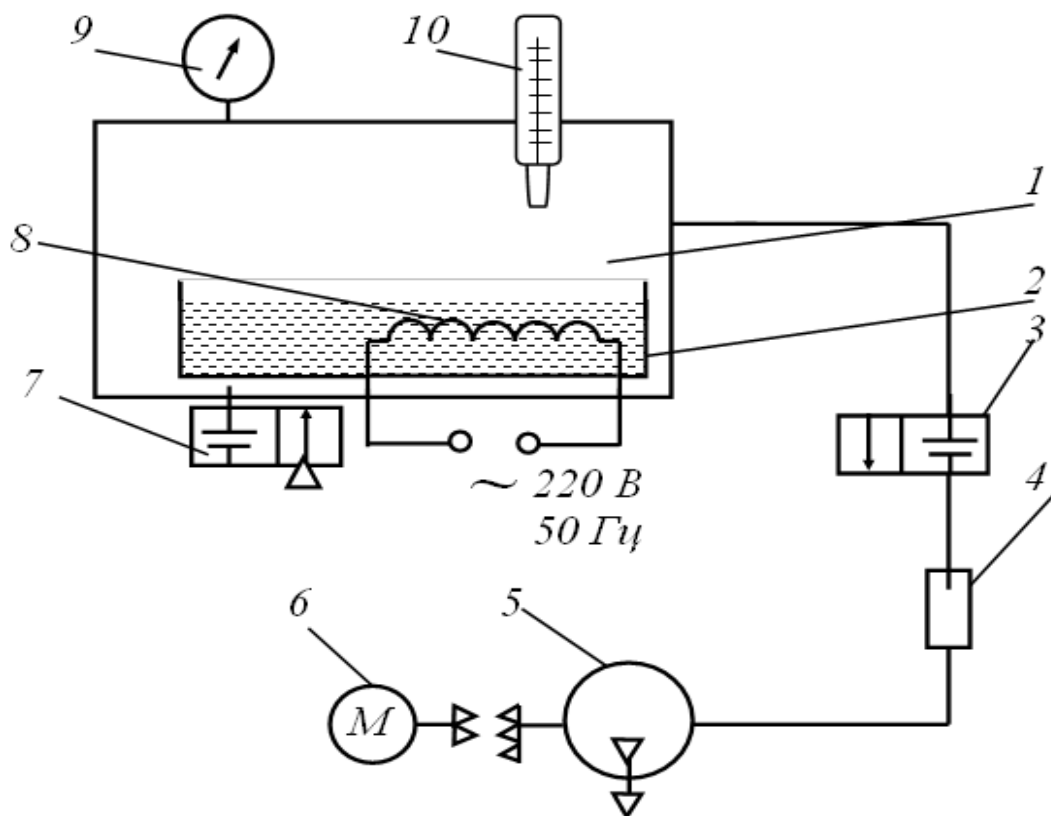


Рис. 4.2. Принципиальная схема установки для вакуумно-сорбционного увлажнения с парогенератором внутри камеры:

- 1 – камера увлажнительная вакуумная; 2 – ванночка с водой;
 3 – вентиль запорный проходной; 4 – ловушка для улавливания конденсата;
 5 – вакуумный насос; 6 – электродвигатель; 7 – вентиль для впуска воздуха;
 8 – электронагреватель; 9 – вакуумметр; 10 – термометр

Для измерения давления внутри рабочей камеры использовался электронный датчик давления с аналоговым выходом типа 26PCAFA6D фирмы «Honeywell» (USA) [176–178, 183]. Основой пьезорезисторного датчика с аналоговым выходом данной серии является тензочувствительный элемент. Это четыре идентичных пьезорезистора, имплантированных в канавки, которые вытравлены на поверхности кремниевой мембраны и соединены по мостовой схеме. Внешнее давление вызывает деформацию мембраны, что приводит к разбалансировке моста. Значение создаваемого напряжения рассогласования $U_{\text{вых}}$ (полезный сигнал) прямо пропорционально приложенному давлению.

Основные параметры датчика 26PCAFA6D фирмы «Honeywell» приведены в Приложении А.

Для измерения температуры рабочей среды внутри нижней камеры использовался температурный датчик DS1820 фирмы «DALLAS» (USA) [180, 182]. Цифровой 12-разрядный полупроводниковый датчик содержит на полупроводниковом кристалле датчик температуры и аналого-цифровой преобразователь. Датчик не нуждается в калибровке и преобразователе и может быть не только термодатчиком, но и термостатом, что может быть реализовано во внутренних настройках датчика при его программировании и монтаже.

Основные параметры датчика DS1820 приведены в Приложении А.

В качестве регистрирующей аппаратуры использовался персональный компьютер.

Блок-схема аппаратной части экспериментальной установки для интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви в вакууме с использованием вышеописанных датчиков приведена на рис. 4.3.

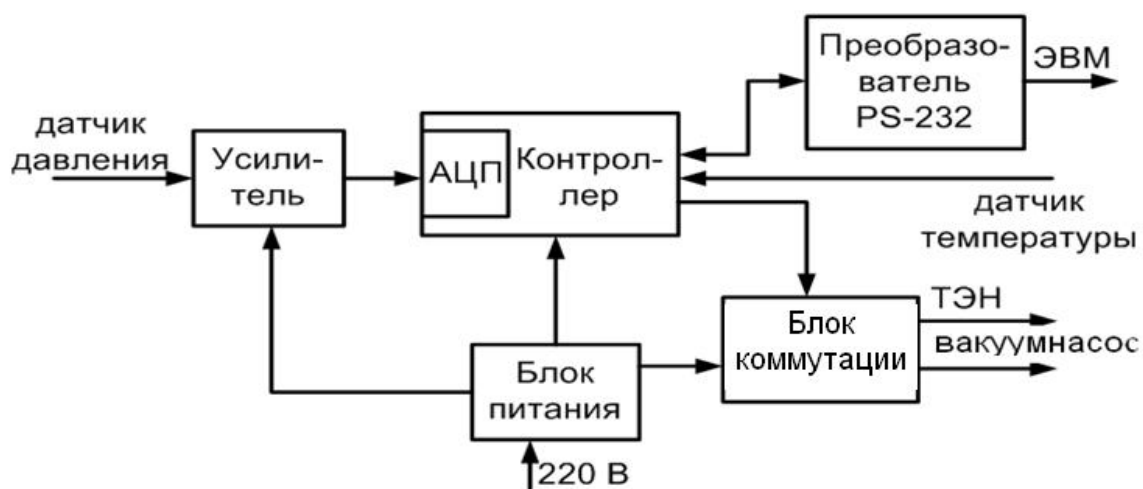


Рис. 4.3. Блок-схема аппаратной части экспериментальной установки

Основным вычислительным устройством блока является микроконтроллер семейства AVR. Работа блока осуществлялась следующим образом: усилитель увеличивает дифференциальный сигнал с датчика давления, после чего он поступал на АЦП и контроллер, где оцифровывался с 12-битной точностью два раза в секунду. Цифровые данные с датчика температуры непосредственно поступали в контроллер (точность датчика 0,5 °C) два раза в се-

кунду. На основе полученных данных контроллер формирует закон управления для ТЭНа и вакуумного насоса в двух режимах: автоматическом и ручном.

Автоматически режим обеспечивает значения параметров в заданных пределах, а при ручном режиме включение и отключение ТЭНа и вакуумного насоса осуществляется оператором.

Для сбора и отображения экспериментальных данных устройство подключалось к ПК через специальный преобразователь уровней RS-232.

Для управления работой установки разработана программа [138] «Информационно-управляющая оболочка опытной установки для гигротермической обработки кож», рабочее окно которой приведено на рисунке 4.4. Программа предназначена для формирования управляющих воздействий (в зависимости от выбранного режима работы) в соответствии с таблицей, заданной пользователем двух параметров давления и температуры на систему управления опытной установкой для гигротермической обработки кож.

Рис. 4.4. Фрагмент использования программы

В автоматическом или ручном режиме управления при увлажнении необходимо соблюдать соотношение температуры и давления согласно равенству $T = 2028 \cdot P^{0,31}$ (рис. 4.5) [133].

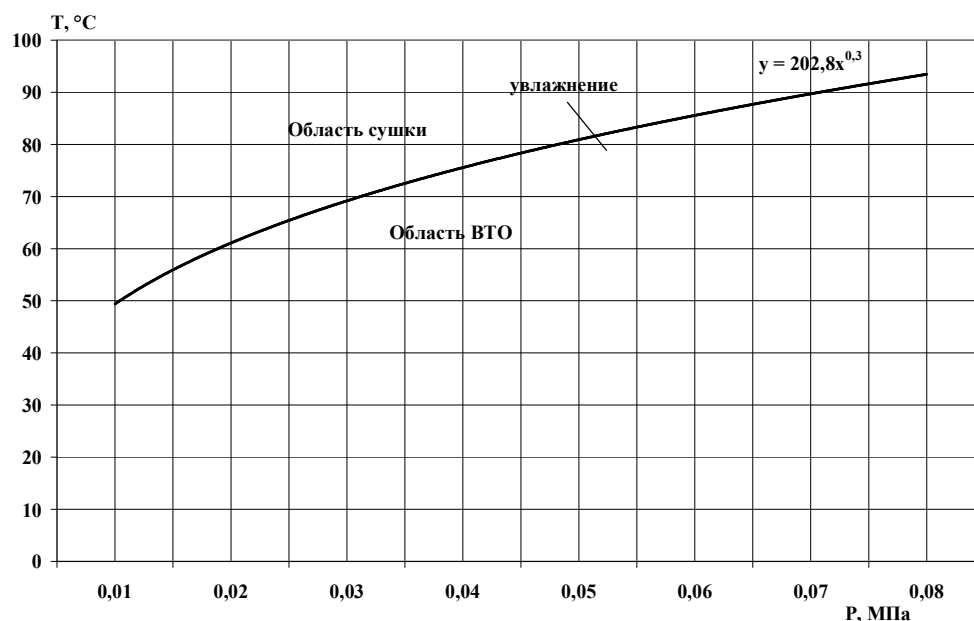


Рис. 4.5. График зависимости температуры водяного пара в состоянии насыщения от давления [134]

4.1.4. Методика проведения экспериментов

Подготовленные, как описано выше в разделе 4.2, к проведению экспериментов, образцы кож хромового дубления подвергались увлажнению в течение 5 минут.

В процессе увлажнения по первому способу подачи влажного пара образцы в камере располагались в двух зонах – непосредственно над впускным патрубком, соединяющим камеру через вентиль с водяным бачком (зона 1) и на расстоянии 150 мм по горизонтали от патрубка (зона 2).

Камера вакуумировалась до остаточного давления 0,02 МПа. Затем вакуумный насос отключался и перекрывалась система вакуумирования, а камера через вентиль соединялась с герметичным бачком, в котором находилась нагретая вода. Под действием низкого давления происходило бурное кипение воды, образовавшийся пар поступал по трубопроводу в камеру. По истечении времени выдержки камера соединялась с атмосферой. Температура воды в бачке при проведении опытов менялась в диапазоне 60–80 °C для того, чтобы достичь при принятом объеме вакуумной камеры и остаточном давлении 0,02 МПа значений температуры, соответствующих состоянию насыщения среды водяными парами на 97–99 % [133].

Для исключения возможности конденсации пара на поверхности образцов за счёт разницы их температуры и температуры паровой среды, камера с помещёнными в неё образцами предварительно нагревалась до 50 °С, а началом опыта считался момент достижения в увлажнительной камере температуры 60 °С и остаточного давления 0,02 МПа.

4.1.5. Исследование интенсивности вакуумно-сорбционного увлажнения на установке с парогенератором вне камеры

С целью установления влияния интенсивности парообразования на процесс увлажнения в вакууме температура нагрева воды в отдельно стоящем парогенераторе менялась в диапазоне 60–80 °С. Образцы в камере располагались в двух зонах – непосредственно над впускным патрубком (зона 1), соединяющим камеру через вентиль с водяным бачком (парогенератором), и на расстоянии 150 мм по горизонтали от патрубка (зона 2).

Первая серия экспериментов проведена при наличии в соединительной системе парогенератор – камера вентиля с диаметром проходного сечения 3 мм.

Результаты экспериментов представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Влияние температуры предварительного нагрева воды в парогенераторе на относительную влажность кож хромового дубления (диаметр проходного сечения вентиля 3 мм)

Температура воды, °С	Конечное остаточное давление в камере, МПа	Конечная температура в камере, °С	Относительная влажность	
			Зона 1	Зона 2
60	0,024	55	23,5±1,2	22,4±1,1
70	0,028	56	24,0±1,2	22,4±1,1
80	0,034	58	24,3±1,3	22,6±1,2

Как видно из данных таблицы 4.2, значения относительной влажности образцов, находившихся в разных зонах, отличаются не более чем на 2 %. При этом с увеличением температуры воды относительная влажность как в той, так и в другой зонах возрастала.

По мере увеличения температуры воды в бачке, температура в камере незначительно (в пределах точности измерения) росла. Конечное остаточное давление в камере изменялось незначительно в интервале температур 60–70 °С от 0,024 до 0,028 МПа, максимальный рост – 0,034 МПа наблюдался при температуре воды 80 °С.

Полученный в этой серии опытов малый привес влаги в образцах, объясняется, очевидно, тем, что из-за низкой пропускной способности вентиля в камеру поступало небольшое количества пара.

Очевидно, что градиенты влажности и температуры, под действием которых влага проникала в образцы, в этих условиях были небольшими. В связи с этим дальнейшие опыты были проведены при диаметре проходного сечения вентиля 10 мм, а температура воды в бачке изменялась от 60 до 90 °С (табл. 4.3).

Таблица 4.3 – Влияние температуры предварительного нагрева воды в парогенераторе на относительную влажность кож хромового дубления (диаметр проходного сечения вентиля 10 мм)

Температура воды, °С	Конечное остаточное давление в камере, МПа	Конечная температура в камере, °С	Относительная влажность	
			Зона 1	Зона 2
60	0,036	53	26,0±1,3 (25,8±1,3)	23,9±1,1 (24,6±1,2)
70	0,040	55	26,8±1,3 (26,4±1,3)	24,0±1,2 (25,3±1,2)
80	0,042	58	27,0±1,4 (26,8±1,3)	25,2±1,2 (25,8±1,2)
90	0,043	62	27,1±1,4 (26,8±1,3)	25,2±1,2 (25,6±1,2)
Примечание: Значения в скобках получены после установки над впускным патрубком в камере рассекателя паровой струи для увеличения зоны интенсивного паропотока.				

Увеличение пропускной способности вентиля привело к ощутимому росту привеса влаги в увлажняемых образцах (таблица 4.3). Однако, теоретически рассчитанный привес влаги в образцах достигнут не был. Кроме того, в первый момент после открытия вентиля отмечался выброс воды из бачка вследствие резкого перепада давлений. Выброс воды приводил к частичному

намоканию образцов, расположенных непосредственно над патрубком (входом пароводяной смеси в камеру).

Установка отражателя и рассекателя пара перед входным отверстием пара в камеру значительно усреднило показатели относительной влажности образцов в разных точках камеры.

Однако и в этой серии опытов максимальная влажность образцов после обработки достигнута не была. Кроме этого, с ростом температуры воды выше 80 °С практического привеса увлажнения не наступало, более того, в ряде опытов наблюдалось снижение влагосодержания.

Это явление, на наш взгляд, связано с изменением термодинамического состояния пара, переходящего из области относительно высокого давления в бачке в зону более низкого давления в камере, а также с тем, что некоторое превышение давления пара в бачке над давлением среды в камере приводило к уменьшению интенсивности парообразования.

В связи с неравномерностью увлажнения образцов, находящихся в интенсивном паропотоке и вне его, были проведены эксперименты по изменению рабочего объёма камеры при неизменном её общем объёме и постоянном объёме и площади зеркала воды в бачке. Это достигалось введением в камеру дополнительных перегородок, ограничивающих распространение интенсивного паропотока в разные стороны.

В результате проведённых экспериментов было выявлено следующее. По мере уменьшения рабочего объёма камеры влажность образцов, находящихся в разных зонах, нивелировалась и возрастала. Одновременно с этим росло, приходящееся на единицу рабочего объёма камеры, количество воды, выброшенной из бачка. Когда рабочий объём был доведён до 1/3 объёма камеры, наблюдалось образование конденсата водяного пара как на стенках, так и на поверхности образцов.

С целью исследования влияния размеров вакуумной камеры на относительную влажность кож были проведены эксперименты по уменьшению общего объёма камеры при неизменном объёме бачка-парогенератора. Это дос-

тигалось введением в камеру наполнителя с малой гигроскопичностью. Опыты показали, что с уменьшением объёма камеры давление в ней росло быстрее, что приводило к быстрому затуханию парообразования в бачке и, как следствие, незначительному увлажнению образцов. Это хорошо согласуется с теоретическими данными [111], согласно которым существует критическое соотношение между объёмом камеры, величиной разрежения (вакуума) и массой изделий, помещённых в камеру, меньше которого вакуумно-сорбционное увлажнение практически не происходит, так как процесс при быстром повышении давления в камере за счёт парообразования переходит в другую фазу – увлажнение сорбцией влаги из паровоздушной среды, при давлениях, близких к атмосферному.

4.1.6. Исследование интенсивности вакуумно-сорбционного увлажнения на установке с парогенератором внутри камеры

Для того чтобы увеличить зону интенсивного паропотока и обеспечить неизменность термодинамического состояния пара с момента его образования и до момента поступления к образцам, парогенератор (ёмкость с водой) помещался в камеру так, что образцы в любой точке находились над открытой водяной поверхностью. Пар, образуемый в процессе кипения предварительно нагретой воды, в условиях пониженного давления внутри камеры не изменяет своего термодинамического состояния и может подаваться к образцам в течение всего промежутка времени.

Результаты опытов с использованием в экспериментальной установке открытой ёмкости с водой представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Влияние температуры предварительного нагрева воды на относительную влажность кож хромового дубления

Температура воды, °С	Конечное остаточное давление в камере, МПа	Конечная температура в камере, °С	Относительная влажность, %
60	0,042	55	33,3±1,7
70	0,044	58	36,2±1,9
80	0,048	67	35,1±1,8
90	0,055	78	32,6±1,6

Максимальный привес влаги в образцах имел место при температуре воды, равной 70 °С (таблица 4.4).

При росте температуры воды происходило увеличение давления и температуры паровоздушной среды в камере, что вызывало уменьшение влагонасыщения образцов. Начальное давление в камере равнялось 0,02 МПа, температура – 50 °С.

В результате исследований по выбору рациональной схемы установки установлено, что наибольший привес влаги в образцах, соответствующий максимальным значениям относительной влажности, наблюдался в том случае, когда подача паров влаги к образцам осуществлялась испарением подогретой воды с открытой поверхности воды, находящейся в ёмкости, установленной внутри камеры.

4.2. Исследование влияния длительности процесса вакуумно-сорбционного увлажнения на относительную влажность кож хромового дубления

Для проверки адекватности полученных в третьей главе аналитических выражений (3.59, 3.60) реальному процессу вакуумно-сорбционного увлажнения были проведены эксперименты по увлажнению образцов кожи хромового дубления при различных промежутках времени.

При проведении экспериментов начальное остаточное давление и температура в камере составляли соответственно 0,02 МПа и 50 °С, температура предварительного нагрева воды – 70 °С.

Полученные результаты приведены в таблице 4.5. и на рисунке 4.6.

Таблица 4.5 – Значения теоретического и экспериментального привесов влаги в коже хромового дубления в зависимости от времени вакуумно-сорбционного увлажнения

Показатели привеса, %	Время увлажнения, мин			
	2	4	6	8
Теоретический	12,0	16,1	18,0	18,8
Экспериментальный	15,0±1,0	18,9±1,1	19,8±1,2	12,6±1,0

Значения привесов влаги (исходная относительная влажность кож 18 %), полученные экспериментально (таблица 4.5), отличаются от соответствующих значений, рассчитанных теоретически, при увлажнении в течение 2-х минут – на 20 %, при 4-х минутах – на 15 %, при 6-ти минутах – на 9 %, что свидетельствует об адекватности реального процесса и теоретически описанного, с помощью полученных выражений, процесса.

Из анализа приведённых данных следует, что увеличение относительной влажности наблюдается в интервале времени от 2 до 6 минут. При этом прирост влаги в диапазоне от 2 до 4 минут составил 37 %, а в диапазоне от 4 до 6 мин. – 5 %. При дальнейшем увеличении времени прироста влаги в образцах не наблюдалось, а происходило его снижение. Это можно объяснить, очевидно, тем, что эффузионный перенос влаги при пониженном давлении имеет место до определённого предела, затем давление в камере поднимается, решающее значение приобретает внешний массоперенос, при котором происходит обратная диффузия влаги из образцов в рабочую зону камеры под действием градиента температуры.

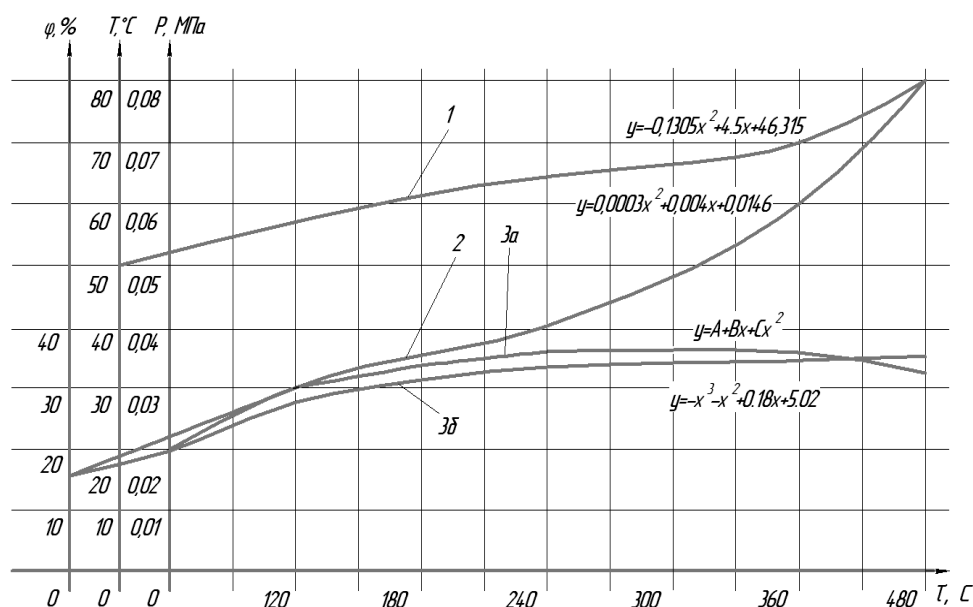


Рис. 4.6. Зависимости температуры T (1), конечного разрежения P (2) и относительной влажности кож хромового дубления ϕ % (3) от времени вакуумно-сорбционного увлажнения:
3а – экспериментальная; 3б – теоретическая

В ходе экспериментальных исследований установлено, что оптимальное время увлажнения заготовок обуви, при котором обеспечивается необходимый привес влаги (16,5 %) в образцах, выкроенных из чепрачной части кожи хромового дубления для верха обуви, составляет от 4 до 6 минут, в соответствии с разработанной математической моделью. Установка с парогенератором, расположенным внутри рабочей камеры, на которую получено авторское свидетельство СССР № 1391589 [12], соответствует наилучшим условиям проведения вакуумно-сорбционного увлажнения.

В связи с тем, что ассортимент материалов для верха обуви достаточно широк и включает в себя и кожи повышенных толщин для бесподкладочной обуви, и системы материалов – деталь верха + межподкладка + подкладка, необходима проведение серии дополнительных экспериментов по их увлажнению.

Увлажнение этих материалов, является сложным теплофизическим и технологическим процессом, поэтому была проведена серия опытов, в которых исследовалось влияние способа увлажнения на их относительную влажность, время увлажнения в вакууме было выбрано равным 6-ти минутам. Результаты представлены в таблице 4.6.

Т а б л и ц а 4.6 – Значения относительной влажности кож хромового дубления для верха бесподкладочной обуви и систем материалов в зависимости от способа увлажнения

Способ увлажнения	Относительная влажность кожи, системы, %		
	кожа хромового дубления для верха бесподкладочной обуви	кожа хромового дубления+ тик-саржа	кожа хромового дубления+ бязь+тик-саржа
Сорбционный	$25,7 \pm 1,3$	$25,9 \pm 1,3$	$30,2 \pm 1,5$
Вакуумно-сорбционный	$35,8 \pm 1,8$	$35,5 \pm 1,8$	$35,8 \pm 1,8$

Применение вакуума для всех трёх типов испытуемых материалов (таблица 4.6) позволяет наряду со значительным сокращением времени увлажнения (6 минут против 1,5–2 часов при традиционном способе увлажнения) обеспечить повышение относительной влажности на 5–10 %.

4.3. Задачи и методика исследований влияния параметров процесса вакуумно-сорбционного увлажнения на показатели физико-механических свойств, определяющих формуемость кож хромового дубления и систем материалов

Определяющим при выборе параметров процесса вакуумно-сорбционного увлажнения является не только обеспечение необходимой по технологии изготовления обуви относительной влажности в заготовках верха обуви, которая, как следует из таблицы 4.6, при всех исследуемых режимах находится в пределах 32–34 %, но и достижение максимально возможного изменения формовочных свойств кож и систем материалов [107, 112, 124]. Установление связи между режимами вакуумно-сорбционного увлажнения и показателями формовочных свойств кож и систем материалов является задачей, решаемой на этом этапе исследований.

Формовочные свойства кож и систем материалов оценивались показателями: остаточное и полное удлинение при напряжении 10 МПа, предел прочности при растяжении, удлинение и нагрузка при разрыве, условный модуль упругости [108]. Вышеуказанные показатели образцов кож хромового дубления и систем материалов в воздушно-сухом состоянии, увлажнённых традиционным способом – сорбцией влаги из паровоздушной среды (без вакуума) и вакуумно-сорбционным способом, определялись согласно ГОСТам [26–29] на разрывной машине типа РТ-250-М с электронной приставкой.

В качестве основных показателей были выбраны остаточное и полное удлинение при напряжении 10 МПа, близкого к воздействиям на детали верха при их изготовлении, и условный модуль упругости.

Так как известно [47], что между остаточным удлинением (деформацией) и остаточными напряжениями существует прямая линейная корреляционная связь, поэтому о формуемости судили по остаточным удлинениям кожи. Чем больше остаточные удлинения, тем лучше формуемость.

Условный модуль упругости связывает напряжение с продольной линейной деформацией. Чем меньше линейная деформация при напряжении 10 МПа, т.е. чем жёстче материал, тем больше модуль упругости и хуже формуемость.

Результаты сравнительных исследований физико-механических показателей, полученных при одноосном растяжении образцов кож хромового дубления в воздушно-сухом состоянии, увлажнённых традиционным способом – сорбцией влаги из паровоздушной среды до привеса влаги в них 10 ± 2 % и вакуумно-сорбционным способом, представлены в таблицах 4.7, 4.8.

Т а б л и ц а 4.7 – Изменение физико-механических показателей образцов кожи хромового дубления при увлажнении сорбцией влаги из паровоздушной среды

Показатели	Воздушно-сухие образцы	Увлажнённые образцы
Привес влаги, % в продольных образцах	-	$11,2 \pm 0,8$
в поперечных образцах	-	$14,0 \pm 1,0$
средний	-	$12,6 \pm 0,9$
Остаточное удлинение при 10 МПа, %		
продольное	13 ± 1	12 ± 1
поперечное	14 ± 1	14 ± 1
среднее	$13,5 \pm 1$	13 ± 1
Полное удлинение при 10 МПа, %		
продольное	17 ± 1	28 ± 2
поперечное	26 ± 1	34 ± 3
среднее	$21,5 \pm 1,0$	31 ± 2
Нагрузка при разрыве, Н		
продольная	135 ± 8	233 ± 15
поперечная	135 ± 10	208 ± 13
средняя	135 ± 9	221 ± 14
Предел прочности при растяжении, МПа		
продольный	$17,1 \pm 1,0$	$25,0 \pm 1,8$
поперечный	$20,7 \pm 1,8$	$25,4 \pm 2,0$
средний	$18,9 \pm 1,4$	$25,2 \pm 1,9$
Удлинение при разрыве, %		
продольное	40 ± 3	60 ± 4
поперечное	60 ± 4	74 ± 6
среднее	50 ± 3	67 ± 5
Условный модуль упругости, МПа		
продольный	$46,0 \pm 3,4$	$27,8 \pm 2,1$
поперечный	$35,0 \pm 3,0$	$25,0 \pm 2,0$
средний	$40,5 \pm 3,2$	$26,4 \pm 2,0$

Таблица 4.8 – Изменение физико-механических показателей образцов кожи хромового дубления в зависимости от длительности вакуумно-сорбционного увлажнения

Показатели	Время увлажнения, мин.			
	2	4	6	8
Привес влаги, % в продольных образцах в поперечных образцах средний	15,0 ± 1,0 16,4 ± 1,0 15,7 ± 1,0	18,8 ± 1,2 19,7 ± 1,8 19,3 ± 1,5	19,0 ± 1,2 16,2 ± 1,0 17,6 ± 1,1	11,6 ± 0,7 11,6 ± 0,7 11,6 ± 0,7
Остаточное удлинение при 10 МПа, % продольное поперечное среднее	14 ± 1 18 ± 1 16 ± 1	18 ± 2 28 ± 2 23 ± 2	16 ± 1 23 ± 2 19,5 ± 1,5	14 ± 1 13 ± 1 13,5 ± 1
Полное удлинение при 10 МПа, % продольное поперечное среднее	22 ± 2 28 ± 2 25 ± 2	29 ± 2 52 ± 3 40,5 ± 2,5	25 ± 2 42 ± 3 33,5 ± 2,5	25 ± 2 34 ± 2 29,5 ± 2
Нагрузка при разрыве, Н продольная поперечная средняя	290 ± 16 236 ± 15 263 ± 15	240 ± 9 180 ± 8 210 ± 8	230 ± 17 145 ± 11 188 ± 14	215 ± 14 140 ± 9 180,5 ± 11,5
Предел прочности при растяжении, МПа продольный поперечный средний	33,3 ± 2,1 29,5 ± 1,8 31,4 ± 2,0	30,0 ± 1,2 23,5 ± 1,1 27 ± 1,1	28,3 ± 2,0 22,0 ± 2,0 25,0 ± 2,0	28,9 ± 1,7 18,9 ± 1,5 23,9 ± 1,6
Удлинение при разрыве, % продольное поперечное среднее	66 ± 4 75 ± 5 71 ± 5	66 ± 5 75 ± 5 71 ± 5	63 ± 4 72 ± 4 68 ± 4	59 ± 4 55 ± 3 57 ± 4
Условный модуль упругости, МПа продольный поперечный средний	40,0 ± 2,5 28,1 ± 1,7 34 ± 2,1	27,7 ± 1,7 15,2 ± 0,9 21,5 ± 1,3	40,4 ± 2,5 17,5 ± 1,0 29 ± 1,8	33,8 ± 2,1 23,7 ± 1,5 28,8 ± 1,8

Построенные по экспериментальным данным графические зависимости, полного и остаточного удлинений при 10 МПа от времени вакуумно-сорбционного увлажнения кож хромового дубления (рис. 4.7) имеют явно выраженный максимум, соответствующий увлажнению в течение 4-х минут и привесу влаги в пределах 18–19 %. Это хорошо согласуется с данными исследований, выполненных под руководством Е.Я. Михеевой [110], в которых установлено, что имеется определённое значение оптимальной влажности, при которой остаточные значения максимальны.

При традиционном способе увлажнения оптимальным является привес влаги в 15 % [48]. Превышение оптимальной влажности, полученной при вакуумно-сорбционном способе увлажнения на 3-4 %, объясняется, очевидно,

особенностями проникновения и действия влаги на внутреннюю структуру кожи при этом способе увлажнения.

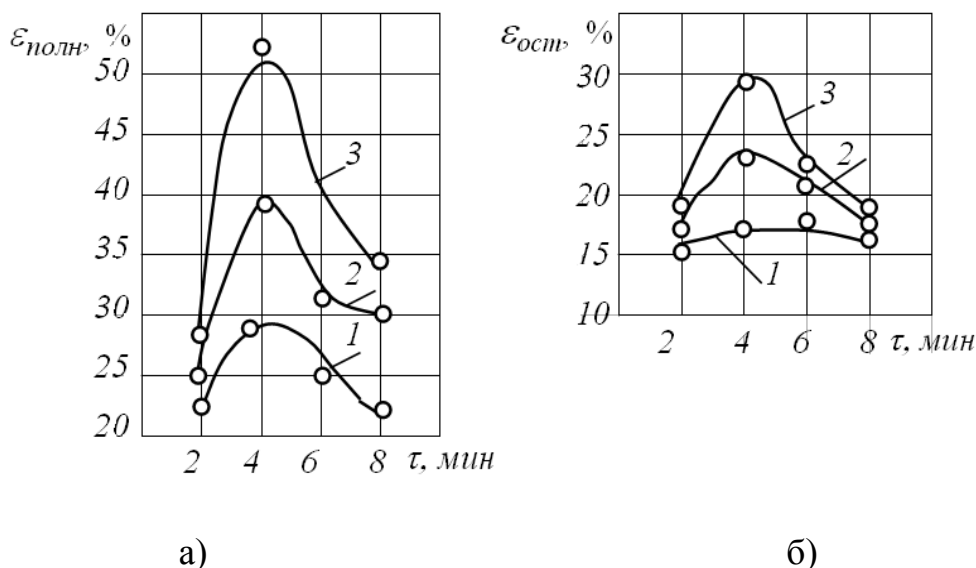
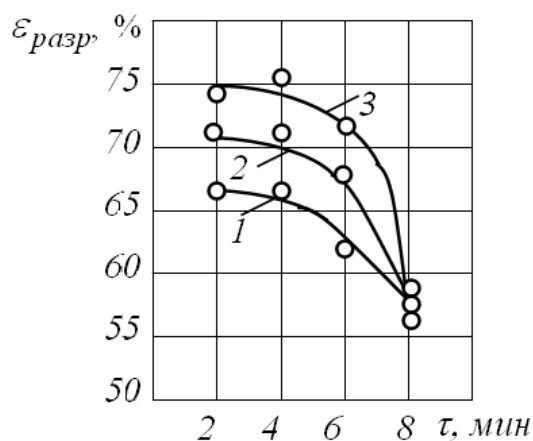


Рис. 4.7. Зависимости полных (а) и остаточных (б) удлинений при 10 МПа кож хромового дубления от времени вакуумно-сорбционного увлажнения:
1 – продольные образцы; 2 – средние значения; 3 – поперечные образцы

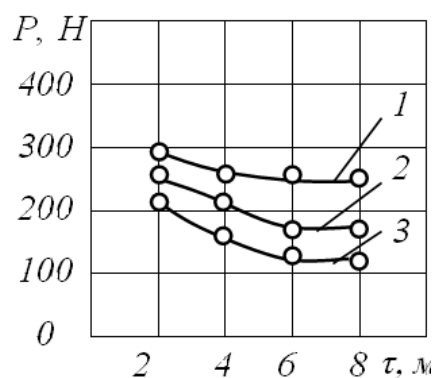
Полученные значения полных удлинений также хорошо согласуются с литературными данными [60] о приросте удлинения при растяжении влажных обувных заготовок в 2 и более раза.

Полученные максимальные значения удлинения и нагрузок при разрыве, предела прочности при растяжении (рис. 4.8) приходятся на время увлажнения в течение 2-х минут и привес влаги 15–16 %.

Как видно из рисунка 4.9, зависимость условного модуля упругости от времени увлажнения имеет более сложный характер (рис. 4.9). Наименьшее его значение приходится на время увлажнения в течение 4-х минут, при этом же времени достигаются и максимальные значения полного и остаточных удлинений при напряжении 10 МПа.



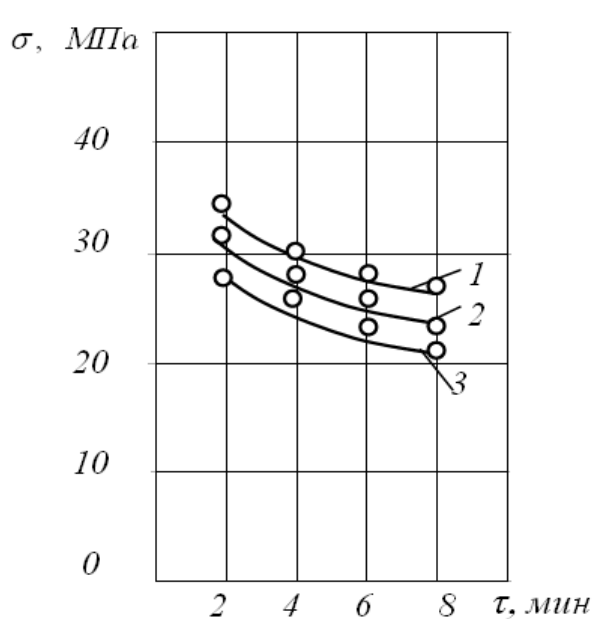
а)



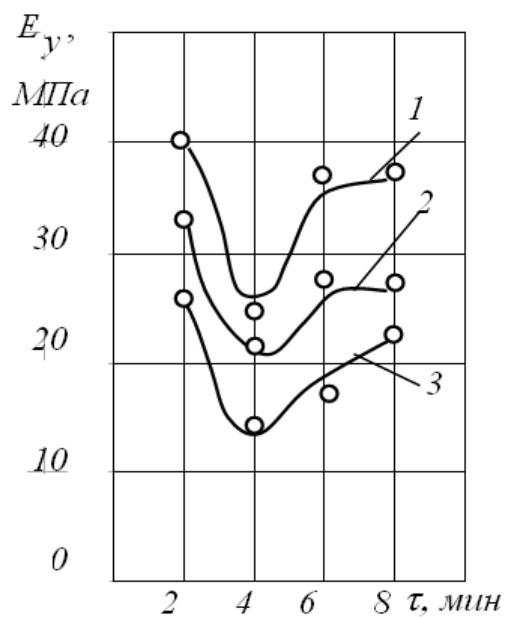
б)

Рис. 4.8. Зависимости удлинений (а) и нагрузки (б) при разрыве кож от времени вакуумно-сорбционного увлажнения:

1 – продольные образцы; 2 – средние значения; 3 – поперечные образцы



а)



б)

Рис. 4.9. Зависимости предела прочности при растяжении (а) и условного модуля упругости (б) кож хромового дубления от времени вакуумно-сорбционного увлажнения:

1 – продольные образцы; 2 – средние значения; 3 – поперечные образцы

Однако, значения всех показателей физико-механических свойств для поперечных и продольных образцов неодинаковы при одном и том же вре-

мени увлажнения из-за анизотропии свойств кожи в продольном и поперечном направлениях.

Полученное в ходе экспериментов снижение абсолютных значений физико-механических показателей кожи хромового дубления при увеличении времени увлажнения согласуется с литературными данными [158] о том, что при сорбции влаги микрокапиллярами температура поверхности кожи за счёт теплоты сорбции становится выше температуры увлажняющей среды на 15–17 °С. Таким образом, после выемки образцов из камеры возникает большой перепад температур между кожей и окружающей средой, вследствие чего влага, перемещаясь термодиффузией из внутренних слоёв к поверхности, испаряется, что и сказывается отрицательно на физико-механических показателях кожи.

Экспериментально полученные графические зависимости (рис. 4.7–4.9) аппроксимируются соответствующими функциями, виды которых (эмпирические коэффициенты A , B , C и коэффициенты корреляции R) приведены в таблице 4.9.

Как видно из данных таблицы 4.9, соответствующие графические зависимости физико-механических показателей кож хромового дубления от времени вакуумно-сорбционного увлажнения описываются уравнениями одного и того же вида как для поперечных, так и для продольных образцов, несмотря на анизотропию свойств кожи в продольном и поперечном направлениях.

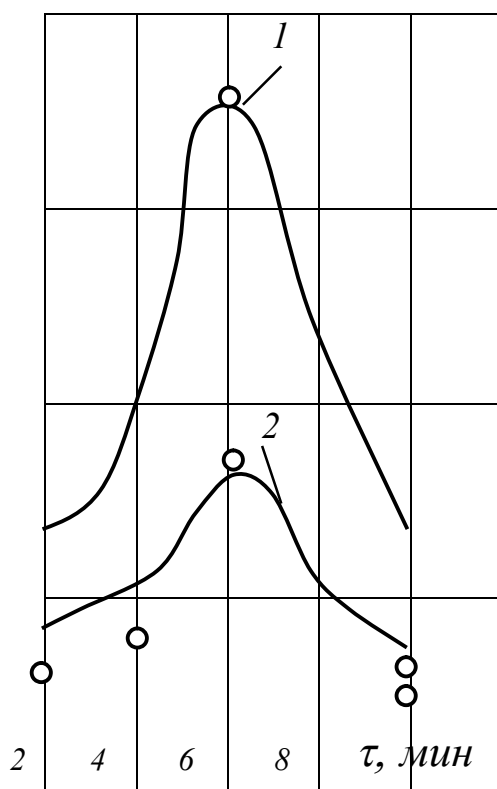
Таблица 4.9 – Результаты аппроксимации кривых изменения физико-механических свойств кожи хромового дубления, полученных при различном времени вакуумно-сорбционного увлажнения

Вид зависимости и расположение образцов относительно хребта	Аппроксимируемая функция	Значения коэффициентов			
		A	B	C	R
$\varepsilon_{\text{полн}} = f_1(\tau)$	$Y = A + B/x + C/x^2$				
продольное		13,06	106,28	- 176,67	0,98
поперечное		0,596	350,86	-591,81	0,99
среднее		3,25	250,50	-414,00	0,96
$\varepsilon_{\text{ост}} = f_2(\tau)$	$Y = A + B/x + C/x^2$				
продольное		4,86	88,62	-140,80	0,99
поперечное		-10,44	255,30	-396,90	0,98
среднее		3,75	129,50	-210,00	0,95
$\varepsilon_{\text{разр}} = f_3(\tau)$	$Y = A + B/x + C/x$				
продольное		73,79	-1,62	-9,07	0,99
поперечное		110,65	-5,65	-48,75	0,96
среднее		80,00	-1,75	-12,00	0,95
$P_{\text{разр}} = f_4(\tau)$	$Y = A + B \cdot x + C/x^2$				
продольное		241,17	-3,40	221,95	0,99
поперечное		194,96	-5,65	206,86	0,99
среднее		187,20	-1,11	-294,5	0,95
$\sigma = f_5(\tau)$	$Y = A + B \cdot x + C/x$				
продольное		30,71	-0,66	7,29	0,99
поперечное		24,75	-0,99	12,17	0,98
среднее		22,10	-0,05	17,60	0,94
$E_y = f_6(\tau)$	$Y = A + B/x + C/x^2$				
продольное		42,31	-94,62	178,90	0,80
поперечное		33,80	-137,18	252,27	0,95
среднее		52,20	-213,40	354,00	0,91

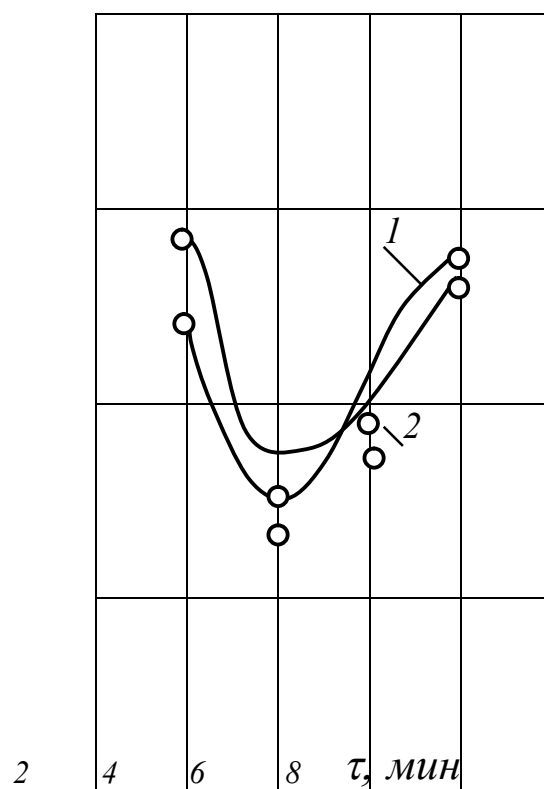
Сопоставляя основные показатели, определяющие формуемость, установлено, что при всех режимах вакуумно-сорбционного увлажнения эти показатели превосходят соответствующие показатели кожи хромового дубления в воздушно-сухом состоянии и увлажненной традиционным способом (рис. 4.10).

$$\frac{\varepsilon_{ост}^B}{\varepsilon_{ост}^{am}}, \frac{\varepsilon_{ост}^B}{\varepsilon_{ост}^{сух}}$$

$$\frac{E_y^6}{\varepsilon_y^{am}}, \frac{E_y^6}{\varepsilon_y^{сух}}$$



а)



б)

Рис. 4.10. Относительное изменение остаточных удлинений (а) 10 МПа и условного модуля упругости (б) кож хромового дубления от времени вакуумно-сорбционного увлажнения:

1 – относительно воздушно-сухих образцов;

2 – относительно образцов, увлажненных традиционным способом

Установлено, что наиболее эффективно применение вакуума при увлажнении, с точки зрения изменения физико-механических показателей исследуемых материалов, у кожи хромового дубления для верха бесподкладочной обуви.

Полученные значения остаточных удлинений при 10 МПа увлажнённой в вакууме кожи превосходят её соответствующие показатели в воздушно-сухом состоянии в 1,9 раза, для 2-слойной системы – в 1,5 раза и в 1,01 раза – для 3-слойной системы материалов. Условный модуль упругости увлажнённых в вакууме образцов кожи уменьшается в 1,8 раза, для 2-слойной системы

– в 1,5 раза, 3-слойной – в 1,3 раза. Предел прочности при растяжении увлажнённых в вакууме образцов кожи и систем материалов по отношению к воздушно-сухим образцам практически не изменяется.

Меньшая взаимосвязь между применением вакуума и изменением физико-механических показателей 2- и 3-слойных систем материалов объясняется, очевидно, тем, что при увлажнении пакета материалов верха обуви вакуумирование капилляров кожи осуществляется лишь с лицевой стороны, так как клеевая плёнка, наносимая с бахтармянной стороны, препятствует разрезанию. Эта особенность при увлажнении систем материалов по сравнению только с кожей (не дублированной подкладкой) может быть объяснена тем, что в пакетах материалов протекание релаксационных процессов является более сложным явлением, зависящим от свойств каждого материала системы, способа их соединения, направления совмещения и других факторов [4].

В результате экспериментальных исследований увлажнённых кож хромового дубления, систем материалов и кожи хромового дубления для верха бесподкладочной обуви при одноосном растяжении установлено, что больший привес влаги в них достигается при увлажнении вакуумно-сорбционным способом по сравнению с увлажнением сорбционным способом.

Установлено, что все физико-механические показатели, предопределяющие формуемость (полное и остаточное удлинение при напряжении 10 МПа, условный модуль упругости), повышаются при использовании вакуумно-сорбционного способа увлажнения при практически неизменных значениях предела прочности при растяжении, исключая возможность разрыва заготовки верха обуви при проведении обтяжно-затяжных операций. Причём наилучшие показатели физико-механических свойств исследуемых материалов наблюдались при времени вакуумно-сорбционного увлажнения от 4 до 6 минут.

4.4. Влияние длительности процесса вакуумно-сорбционного увлажнения на относительную влажность кож хромового дубления различной выработки

Для экспериментального подтверждения принятой модели равномерного распределения микрокапилляров в структуре материалов, с учётом методики, приведённой в главе 3, вакуумно-сорбционному увлажнению подвергались кожи хромового дубления с эмульсионным покрытием, изготовленные из шкур бычины методом чередующихся половинок на Таганрогском кожевенном заводе по типовой технологии различной толщины (0,95–1,6 мм) и различной выделки, выкроенные из чепрачной части и из остальной площади кож.

Как следует из экспериментальных данных, полученных выше, относительная влажность кож хромового дубления при вакуумно-сорбционном увлажнении является в основном результатом микрокапиллярной конденсации пара при его эффузионном механизме переноса. Известно [43], что при пропитке кож водными дисперсиями полимеров «не только не уменьшается, но в ряде случаев повышается паропроницаемость, присущая натуральной коже». Можно предположить, что при вакуумно-сорбционном способе увлажнения относительная влажность кож хромового дубления различной выработки будет одинаковой. Для подтверждения этого предположения была проведена серия опытов, результаты которых приведены в таблице 4.10.

Полученные данные показывают, что существенное отличие в значениях относительной влажности образцов кож, увлажнённых различными способами, может быть объяснено различными механизмами влагопереноса – длительным диффузионным при увлажнении только сорбционным способом (без вакуума) и более быстрым – эффузионным при вакуумно-сорбционном увлажнении.

Таблица 4.10 – Значения относительной влажности кож хромового дубления различной выработки, выкроенных из чепрачной части в зависимости от способа и времени увлажнения

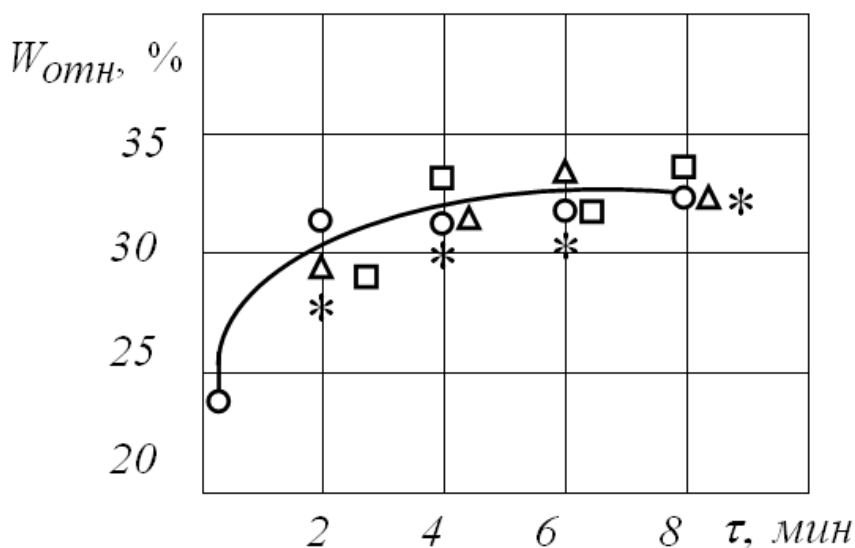
Способ увлажнения	Время увлажнения, мин	Относительная влажность кож хромового дубления для верха обуви, %			
		без додубливания синтаном и наполнения полимером	додублинная синтаном	наполненная полимером	додублинная синтаном и наполненная полимером
Вакуумно-сорбционный	2	31,4±1,5	31,2±1,5	31,4±1,5	31,4±1,5
	4	31,9±1,6	31,5±,5	31,8±1,6	31,9±1,6
	6	32,7±1,6	32,6±1,6	32,8±1,6	32,7±1,6
	8	32,9±1,6	33,0±1,6	32,8±1,6	33,0±1,6
Сорбционный	30	30,0± 1,5	34,3±1,7	22,5±1,1	30,5±1,5
	60	33,6±1,7	39,1± 2,0	28,2±,4	34,8±1,7
	90	36,7±1,8	45,1±2,3	36,9±1,8	36,1±1,8
	120	38,5±1,9	48,8±2,5	41,7±2,1	37,0±1,9
	150	44,1±2,2	53,3±2,7	43,1±2,2	43,2±2,2

При диффузионном механизме проникновения влаги происходит медленное нарастание относительной влажности кожи по мере продвижения влаги под действием градиента влажности не только по микрокапиллярам, но и сквозь их стенки, при эффузионном – перенос влаги в виде пара происходит практически мгновенно, а время конденсации его составляет около 2-х минут, что хорошо согласуется с предположениями Н.И. Николаева [111] о быстром выходе на насыщение в хорошо поглощающем полимере, которым и является предварительно вакуумированная кожа. Дальнейшее увеличение времени выдержки в паровой среде в вакууме обеспечивает привес влаги в них в пределах 1–1,5 %.

Графические зависимости, построенные по данным таблицы 4.10, приведены на рисунке 4.11. Совпадение кривых увлажнения исследуемых кож различных вариантов выработки при вакуумно-сорбционном способе увлажнения объясняется, очевидно, тем, что предварительное вакуумирование исключает влияние изменения степени гидрофильности поверхности структурных элементов кожи, так как увлажнение осуществляется парами воды, а не

конденсатом, на перемещение которого степень гидрофильности поверхности капилляров кожи оказывает существенное влияние.

Между величинами относительной влажности кож Y и временем увлажнения x как при сорбционном (рис. 3.1), так и при вакуумно-сорбционном способе увлажнения (рис. 4.11) существуют прямые зависимости. Эти зависимости описываются уравнениями вида $Y = A \cdot \exp(B/x)$ – для сорбционного способа увлажнения и вида $Y = A + Bx + Cx^2$ – для вакуумно-сорбционного способа увлажнения, где A, B, C – эмпирические коэффициенты.



- Δ – додубленная БНС;
- * – наполненная МХ-30;
- о – наполненная МХ-30 и додубленная БНС;
- – ненаполненная и недодубленная

Рис. 4.11. Кинетика вакуумно-сорбционного увлажнения кож хромового дубления различного характера выработки

Применение вакуумно-сорбционного способа увлажнения обеспечивает равномерный привес влаги в образцах кож, выкроенных из чепрачной части, различных по обработке кож: хромового дубления, додубленных синтнами, наполненных полимерами, что и придаёт ему особую значимость при использовании на обувных предприятиях

4.4.1. Статистический анализ закона распределения показателей относительной влажности долевых образцов кож

Для подтверждения полученной в третьей главе диссертационного исследования модели распределения микрокапилляров в структуре образцов независимо от топографии кожи, образцы выкраивались из всех участков кож и методом случайной генерации комплектовались в партии по семь образцов в каждой и подвергались увлажнению в течение 2-х, 4-х, 6-ти и 8-ми минут (Приложение Б).

Для изучения закона распределения показателей относительной влажности кож была рассмотрена выборочная совокупность из $n = 30 \cdot 2 = 60$ значений для каждой партии образцов. Как известно [56], для выборки объема $n \geq 60$ статистические критерии дают достаточно точные и несмещённые рекомендации на уровне значимости $\alpha = 5\%$.

Выборочные значения показателей относительной влажности кож представлены в Приложении Б для образцов двух типов в зависимости от расположения относительно хребта: 1) вдоль, 2) поперёк. С помощью команд пакета Maple 9.5 были написаны программы для статистических исследований обеих выборочных совокупностей в форме научного блокнота. Содержание этих программ и сопутствующие расчёты приводятся в Приложении Б.

Проведём вначале статистический анализ выборки для долевых образцов кож.

Для полученной по результатам расчётов выборочной совокупности показателей относительной влажности кож (ОВК) был составлен статистический ряд. Количество разрядов статистического ряда вычисляется по правилу Штюргеса [99]:

$$k = [1 + 3,32 \cdot \lg n] + 1 \quad (4.2)$$

здесь $[k]$ – операция вычисления целой части числа.

Таким образом, при объёме выборочной совокупности $n = 60$ количество интервалов статистического ряда равно $k = 6$.

Границы разрядов статистического ряда с частотами выборочных значений, попавших в соответствующий разряд, представлены в таблице 4. 11.

Таблица 4.11 – Статистический ряд для показателей относительной влажности кож

Разряды	1	2	3	4	5	6
Границы разрядов	23,1 25,567	25,567 28,033	28,033 30,5	30,5 32,967	32,967 35,433	35,433 37,902
Частоты	2	6	9	16	17	10

Графическое изображение статистического ряда (гистограмма) представлена на рисунке 4.12.

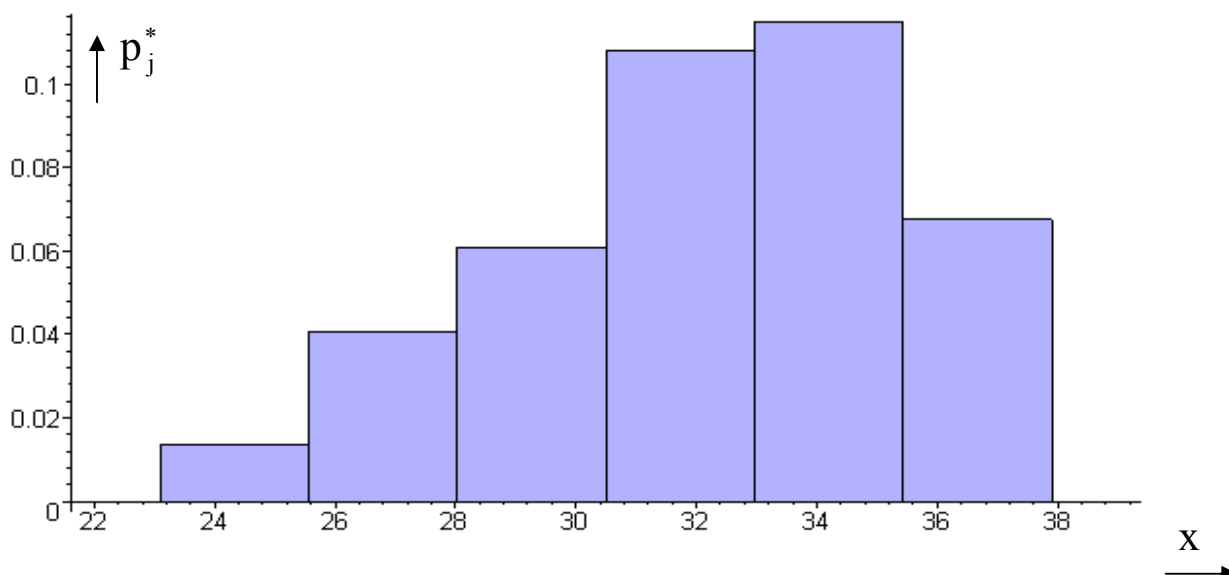


Рис. 4.12. Гистограмма показателей относительной влажности долевых образцов кож

На горизонтальной оси на рисунке 4.12 отложены границы разрядов статистического ряда, на вертикальной оси – относительные частоты, делённые на шаг. Здесь: m_j – количество выборочных значений (табл. 4.11), попавших в j -й разряд, $j=1,2,...,6$; $x_{\max} - x_{\min} = 14,8$ – размах выборки;

$$h = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k} = 2,467 - \text{ шаг выборки; } p_j^* = \frac{m_j}{n \cdot h} - \text{ относительные частоты}$$

выборочных значений, делённые на шаг (значения эмпирической функции плотности).

По выборочной совокупности $\{X[k]\}_{k=1}^n$ наблюдаемых значений случайной величины X вычисляются основные числовые характеристики эмпирического закона распределения:

- 1) среднее по выборочной совокупности $x_{\text{выб}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X[k]$,
- 2) выборочная дисперсия $D_{\text{выб}}(\text{ОВК}) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X[k] - x_{\text{выб}})^2$,
- 3) выборочное среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\text{выб}}(\text{ОВК}) = \sqrt{D_{\text{выб}}(\text{ОВК})}$,
- 4) выборочный коэффициент асимметрии $As_{\text{выб}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X[k] - x_{\text{выб}})^3}{\sigma_{\text{выб}}^3(X)}$,
- 5) выборочный коэффициент эксцесса $E_{\text{выб}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X[k] - x_{\text{выб}})^4}{\sigma_{\text{выб}}^4(X)} - 3$.

Выборочное среднее для полученного ряда наблюдений равно

$$x_{\text{выб}} = 32,0567. \quad (4.3)$$

Выборочное среднее является состоятельной, несмещённой и эффективной оценкой для математического ожидания гипотетического закона распределения. Выборочное среднее указывает на среднее значение распределения показателей относительной влажности кож.

Значение выборочной дисперсии равно

$$D_{\text{выб}} = 9,9418. \quad (4.4)$$

Выборочная дисперсия является состоятельной оценкой для теоретического значения дисперсии гипотетического закона распределения.

Значение выборочного среднеквадратического отклонения равно

$$\sigma_{\text{выб}} = 3,1531.$$

Величина $\sigma_{\text{выб}}$ указывает на средний разброс наблюдаемых значений показателей относительной влажности кож вокруг математического ожидания.

Значение выборочного коэффициента асимметрии по данной выборке

$$As_{\text{выб}} = -0,743$$

существенно меньше нуля и указывает на левостороннюю скошенность гистограммы относительно нормального закона распределения с тем же математическим ожиданием.

Значение выборочного коэффициента эксцесса составило $E_{\text{выб}} = 0,1453$ и указывает на островершинность эмпирической функции плотности относительно плотности нормального закона распределения с теми же параметрами математического ожидания и дисперсии.

Для проверки статистических гипотез о законе распределения изучаемой случайной величины согласно методу моментов неизвестные числовые характеристики гипотетического закона распределения приравниваются к своим эмпирическим оценкам:

$$M(\text{ОВК}) = x_{\text{выб}}; D(\text{ОВК}) = D_{\text{выб}}; As = As_{\text{выб}}; E = E_{\text{выб}}. \quad (4.5)$$

Из приведённых теоретических исследований известно, что распределение показателей относительной влажности кож должно подчиняться гамма-распределению, соответственно проверим гипотезу о гамма-распределении исследуемой выборочной совокупности. Описание основных параметров этого распределения и вид соответствующей функции плотности приводится в [57].

Практическое значение критерия χ^2 при проверке статистических гипотез о законе распределения вычисляется по формуле:

$$\chi_{\text{пр}}^2 = \sum_{j=1}^{k_1} \frac{(m_j - np_j)^2}{np_j}, \quad (4.6)$$

где n – объём выборки;

m_j – количество выборочных значений, попавших в j -й разряд,

p_j – вероятности попадания в j -й разряд случайной величины гипотетического закона распределения;

k_1 – количество разрядов статистического ряда пересчитывается по критерию Пирсона из условия

$$np_j > 5. \quad (4.7)$$

Те разряды, для которых условие (4.7) не выполняется, объединяются с соседними до тех пор, пока (6) будет выполняться.

Значение статистики критерия χ^2 для гамма-распределения по долевым образцам равно:

$$\chi_{\text{пр, вдоль}}^2 = 3,316.$$

Теоретическое значение критерия $\chi_{\alpha, r}^2$ вычисляется в зависимости от числа степеней свободы r и уровня значимости критерия α . Уровнем значимости статистического критерия называется вероятность принятия неправильной основной гипотезы, она задаётся экспериментатором и равна 0,05. Число степеней свободы согласно [56] равно числу разрядов статистического ряда после пересчёта минус число связей, наложенных на частоты:

$$r = k_1 - 1 - 2. \quad (4.8)$$

В Приложении Б показано, что для гамма-распределения $k_1 = 5$.

Связи, наложенные на частоты:

- 1) сумма относительных частот равна единице,
- 2) два неизвестных параметра гамма-распределения приравняются к своим эмпирическим оценкам.

Таким образом, теоретическое значение критерия χ^2 при уровне значимости $\alpha = 0,05$ будет равно

$$\chi_{\alpha; r}^2 = \chi_{0,05; 2}^2 = 5,991.$$

Поскольку $\chi_{\text{пр, вдоль}}^2 = 3,316 < \chi_{\alpha; r}^2 = 5,991$, то нет оснований отвергать гипотезу о гамма-распределении, и она принимается как правдоподобная.

Гамма-распределение задаётся функцией плотности [58]

$$f(x) = \frac{x^{a-1} s^a}{\Gamma(a)} e^{-sx}, \quad (4.9)$$

где $\Gamma(a) = \int_0^{\infty} t^{a-1} e^{-t} dt$ – гамма-функция.

Параметры a и s удовлетворяют следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} x_{\text{выб}} = \frac{a}{s}, \\ D_{\text{выб}} = \frac{a}{s^2}. \end{cases} \quad (4.10)$$

Решая систему (9) относительно a и s , получим:

$$a = \frac{x_{\text{выб}}^2}{D_{\text{выб}}} = 101,64; \quad s = \frac{x_{\text{выб}}}{D_{\text{выб}}} = 3,1707. \quad (4.11)$$

График гипотетической функции плотности в сочетании с гистограммой приводится на рисунке 4.13.

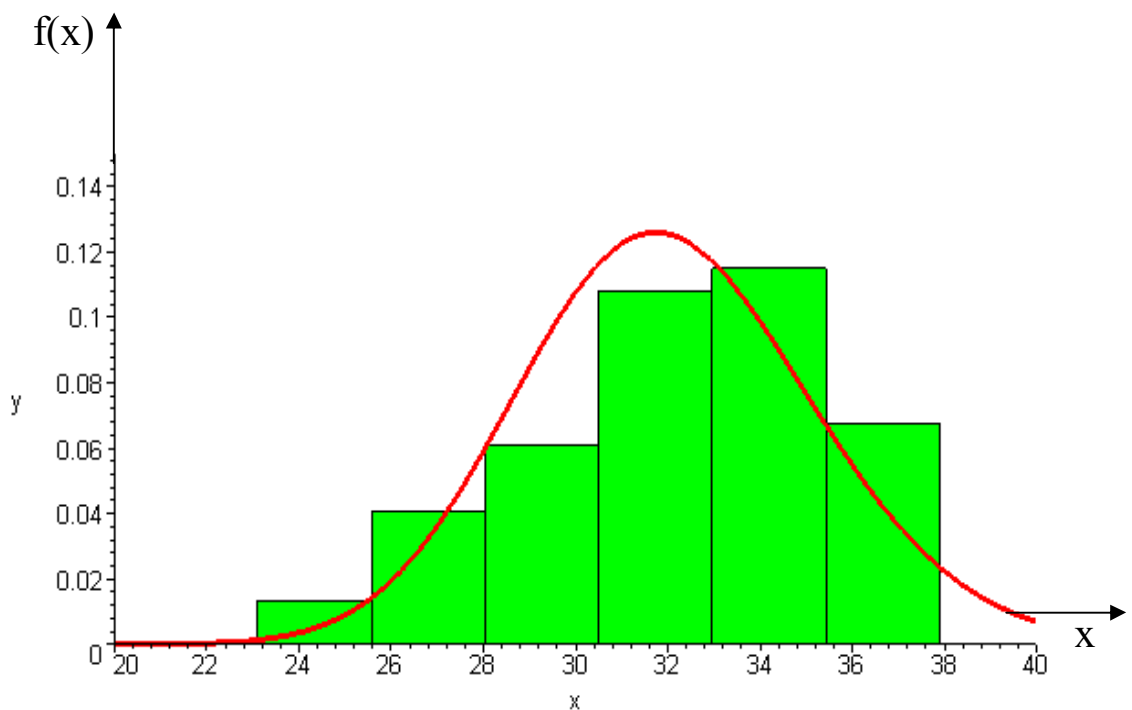


Рис. 4.13. Гистограмма показателей относительной влажности для долевых образцов кож и гипотетическая функция плотности гамма-распределения
Таблица 4.12 – Значения функции плотности гамма-распределения для долевых образцов

Границы разрядов	23,1	25,567	28,033	30,5	32,967	35,433	37,902
Значения функции	$0,128 \cdot 10^{-2}$	0,0140	0,0598	0,1164	0,1171	0,0669	0,0234

По функции плотности гамма-распределения вычисляем:

$$P(\text{ОВК} < 31,9516) = \int_0^{31,9516} f(x) dx = 0,5.$$

Найдём границы интервала $\gamma = 0,95$):

$$P(|\text{ОВК} - M(\text{ОВК})| < 6,2155) = P(25,841 < \text{ОВК} < 38,272) = 0,95.$$

Показатель относительной влажности кож для долевых образцов, рассчитанный по статистическому ряду, по правилу двух сигм изменяется в диапазоне (25,841; 38,272) с доверительной вероятностью 0,95.

4.4.2. Статистический анализ закона распределения показателей относительной влажности для поперечных образцов кож

Для изучения закона распределения показателей относительной влажности кож (ОВК) была рассмотрена выборочная совокупность из $n = 30 \cdot 2 = 60$ значений.

Выборочные значения показателей относительной влажности кож представлены в Приложении Б. С помощью команд пакета Maple 9.5 были написаны программы статистической обработки данных в форме научного блокнота. Содержание этих программ и сопутствующие расчёты приводятся в Приложении Б.

Для полученной по результатам расчётов выборочной совокупности показателей относительной влажности поперечных образцов кож был составлен сгруппированный статистический ряд с количеством разрядов $k = 6$.

Границы разрядов статистического ряда с частотами выборочных значений, попавших в соответствующий разряд, представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Статистический ряд для показателей относительной влажности поперечных образцов кож

Разряды	1	2	3	4	5	6
Границы разрядов	21,3 24,35	24,35 27,4	27,4 30,45	30,45 33,5	33,5 36,55	36,55 39,603
Частоты	1	3	8	23	20	5

Графическое изображение статистического ряда представлено на рисунке 4.14.

↑ p_j^*

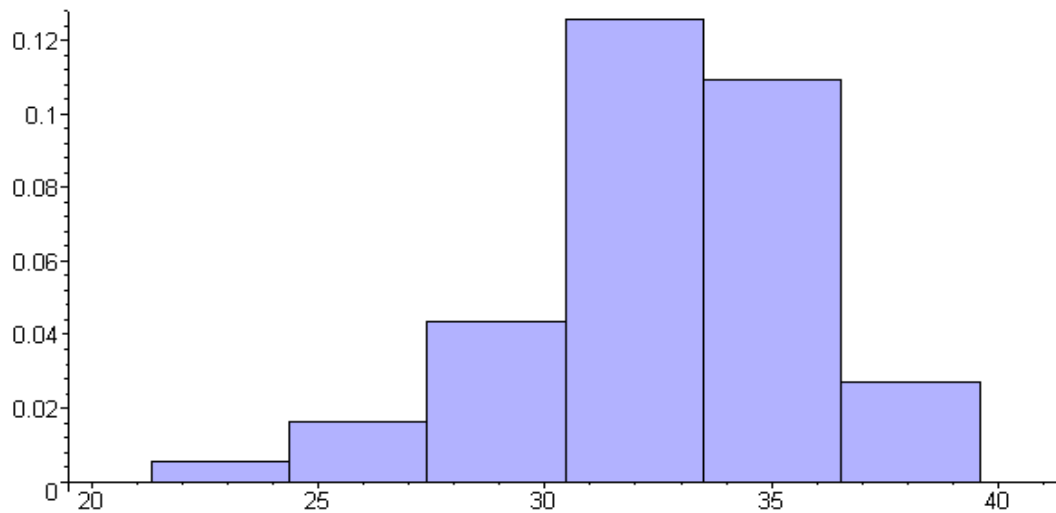


Рис. 4.14. Гистограмма показателей относительной влажности для поперечных образцов кож

По выборочной совокупности $\{X[k]\}_{k=1}^n$ наблюдаемых значений случайной величины (ООВК) вычисляются основные числовые характеристики эмпирического закона распределения $x_{\text{выб}}$; $D_{\text{выб}}$; $As_{\text{выб}}$; $E_{\text{выб}}$.

Выборочное среднее для полученного ряда наблюдений равно

$$x_{\text{выб}} = 32,675. \quad (4.12)$$

Выборочное среднее указывает на среднее значение распределения показателей относительной влажности поперечных образцов кож.

Значение выборочной дисперсии равно

$$D_{\text{выб}} = 11,2282. \quad (4.13)$$

Значение выборочного среднеквадратического отклонения $\sigma_{\text{выб}} = 3,3509$.

Величина $\sigma_{\text{выб}}$ указывает на средний разброс наблюдаемых значений показателей относительной влажности кож вокруг среднего по выборке.

Значение выборочного коэффициента асимметрии по данной выборке

$$As_{\text{выб}} = -0,691$$

существенно меньше нуля и указывает на левостороннюю скошенность гистограммы относительно нормального закона распределения с тем же математическим ожиданием.

Значение выборочного коэффициента эксцесса составило $E_{\text{выб}} = 1,1917$ и указывает на островершинность эмпирической функции плотности относительно плотности нормального закона распределения с теми же параметрами математического ожидания и дисперсии.

Для проверки статистических гипотез о законе распределения изучаемой случайной величины согласно методу моментов неизвестные числовые характеристики гипотетического закона распределения приравниваются к своим эмпирическим оценкам:

$$M(\text{ОВК}) = x_{\text{выб}}; D(\text{ОВК}) = D_{\text{выб}}; As = As_{\text{выб}}; E = E_{\text{выб}}. \quad (4.14)$$

Из приведённых теоретических исследований известно, что распределение показателей относительной влажности кож должно подчиняться гамма-распределению, соответственно проверим гипотезу о гамма-распределении исследуемой выборочной совокупности. Описание основных параметров этого распределения и вид соответствующей функции плотности приводятся в [57].

Значение статистики критерия χ^2 для гамма-распределения по поперечным образцам равно:

$$\chi^2_{\text{пр, поперёк}} = 4,0933.$$

Теоретическое значение критерия $\chi^2_{\alpha, r}$ вычисляется в зависимости от числа степеней свободы r и уровня значимости критерия α . Уровнем значимости критерия Пирсона, как и ранее, принимаем $\alpha = 0,05$. В Приложении Б показано что число разрядов статистического ряда после пересчёта $k_1 = 5$.

Таким образом, теоретическое значение критерия χ^2 на уровне значимости $\alpha = 0,05$ будет равно

$$\chi^2_{\alpha; r} = \chi^2_{0,05; 2} = 5,991.$$

Поскольку $\chi^2_{\text{пр, поперёк}} = 4,0933 < \chi^2_{\alpha; r} = 5,991$ нет оснований отвергать гипотезу о гамма-распределении и она принимается как правдоподобная.

Гамма-распределение задаётся функцией плотности (4.9). Параметры a и s определяются по формулам:

$$a = \frac{x_{\text{выб}}^2}{D_{\text{выб}}} = 93,502; \quad s = \frac{x_{\text{выб}}}{D_{\text{выб}}} = 2,8616. \quad (4.15)$$

График гипотетической функции плотности в сочетании с гистограммой приводится на рисунке 4.15.

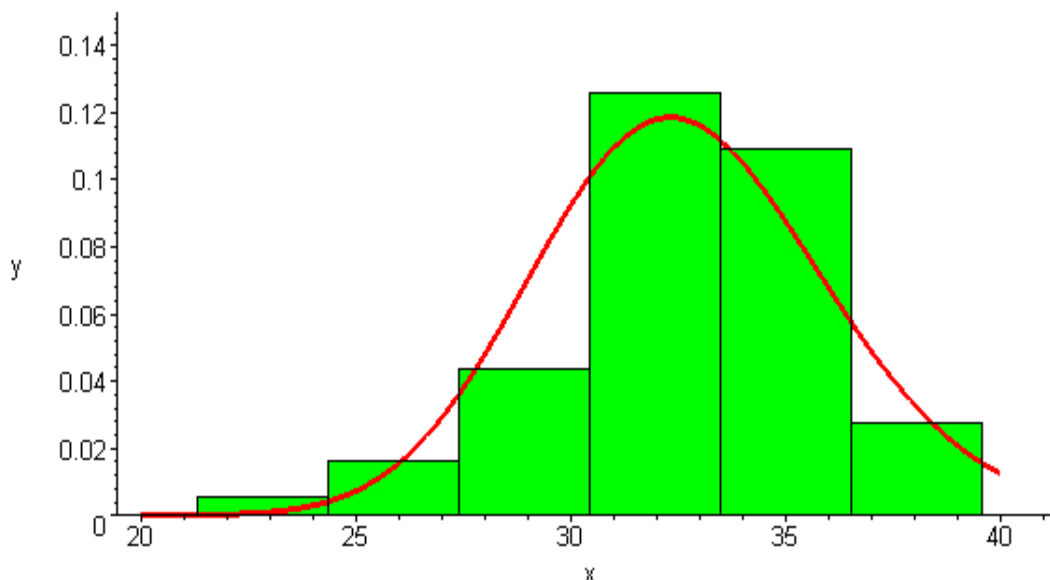


Рис. 4.15. Гистограмма показателей относительной влажности поперечных образцов кож и гипотетическая функция плотности гамма-распределения

Значения функции плотности протабулированы на границах разрядов статистического ряда в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Значения функции плотности гамма-распределения для поперечных образцов

Границы разрядов	21,3	23,45	27,4	30,45	33,5	36,55	39,603
Значения функции	$0,104 \cdot 10^{-3}$	0,00402	0,0358	0,1009	0,1117	0,0573	0.0154

Из полученного закона распределения показателей относительной влажности следуют практические рекомендации. По функции плотности гамма-распределения вычисляем:

$$P(\text{ОВК} < 32,5586) = \int_0^{32,5586} f(x) dx = 0,5.$$

Определим границы доверительного интервала, в который попадает показатель относительного увлажнения кож с вероятностью 95 %.

$$P(|\text{ОВК} - M(\text{ОВК})| < 6,6039) = P(26,071 < \text{ОВК} < 39,279) = 0,95.$$

Таким образом, показатель относительной влажности кож для поперечных образцов на основании статистики эксперимента по правилу двух сигм изменяется в диапазоне (26,071; 39,279).

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости рассматривать разброс показателей относительной влажности кож как неотъемлемую часть явления, обусловленного различной микрокапиллярной пористостью *II* образцов, выкроенных из различных частей кож.

Таким образом, на основании анализа результатов экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- наибольший привес влаги в коже хромового дубления и системе «кожа + тик-саржа» наблюдался в том случае, когда подача влаги к образцам осуществлялась испарением подогретой воды с открытой поверхности ёмкости, установленной внутри камеры;

- установлено, что значения привесов влаги в коже хромового дубления, полученные экспериментально при различной длительности вакуумно-сорбционном увлажнении, отличаются от рассчитанных не более чем на 20 %, что свидетельствует об адекватности реального процесса;

- при вакуумно-сорбционном увлажнении кож хромового дубления различной выработки (только хромового дубления, додубленных синтанамми и наполненных полимерами) установлено практически полное совпадение кривых увлажнения этих кож в исследуемом промежутке времени, что придаёт особую значимость при использовании на обувных предприятиях, обеспечивая одинаковый привес влаги в заготовках обуви независимо от способов выработки кож.

4.5. Исследование влияния режимов интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви на показатели физико-механических свойств кож хромового дубления

Проведённый анализ результатов экспериментальных исследований режимов вакуумно-сорбционного увлажнения показал, что при времени увлажнения, превышающем 6 минут, во всех опытах наблюдалось снижение показателей относительной влажности образцов (рис. 4.6). Это объясняется, очевидно, тем, что эффузионный механизм переноса влаги в виде пара при пониженном давлении имеет место до определённого предела, затем давление в герметичной камере поднимается, вместе с ним растёт температура кожи за счёт сорбции влаги и решающее значение приобретает внешний массо-перенос, при котором происходит обратная диффузия из образцов в рабочую зону, что свидетельствует о начавшемся процессе сушки в условиях пониженного давления.

Отмеченная особенность с учётом анализа кривой релаксации (рис. 1.1) позволила предложить способ гигротермической обработки заготовок верха обуви из натуральных кож с использованием перфорированных колодок [117] для подвода тепла и влаги с бахтармянной стороны кожи.

4.5.1. Задачи и объект исследований

Задачей исследования на данном этапе является подтверждение на основе нового способа гигротермической обработки положения гипотезы о возможности совмещения гигротермических операций после вакуумно-сорбционного увлажнения, обеспечившего микрокапиллярную конденсацию пара, способствующую образованию новых связей в структуре кожи, не разрушаемых при повторных воздействиях тепла и влаги и сохранению формы в новом зафиксированном состоянии.

Новый способ гигротермической обработки включает следующие операции:

- надевание заготовки на пустотелую перфорированную колодку;
- герметизацию колодки с заготовкой воздухонепроницаемой плёнкой;

- создание вакуума изнутри колодки;
- увлажнение;
- создание давления паровоздушной смеси на поверхность заготовки верха обуви с внешней стороны воздухонепроницаемой плёнки (фиксация заготовки);
- последующая, при необходимости, циклическая сушка изнутри заготовки верха обуви;
- влажно-тепловая обработка.

Объектом исследований является установка, реализующая последовательно-параллельный способ гигротермической обработки заготовок, выкроенных из кож хромового дубления в виде кругов диаметром 100 мм с нанесёнными на них концентрическими окружностями диаметром 40 и 60 мм для последующей установки на пуансонах. Они подвергались гигротермической обработке на разработанной универсальной установке с регулируемыми параметрами рабочей среды (конструкция которой приведена далее), обеспечивающей последовательное (с выемкой образцов, находящихся на неперфорированном пуансоне) и последовательно-параллельное, с применением перфорированного пуансона, выполнение операций увлажнения, влажно-тепловой фиксации, сушки и влажно-тепловой обработки в условиях вакуума и без него.

4.5.2. Конструкция экспериментального стенда для исследования режимов гигротермической обработки заготовок верха обуви

Для проведения экспериментальных исследований режимов гигротермической обработки (увлажнения, влажно-тепловой фиксации, сушки и влажно-тепловой обработки) на кафедре «Машины и оборудование бытового и жилищно-коммунального назначения» ИСОиП (филиала ДГТУ) была разработана экспериментальная установка, принципиальная схема которой приведена на рисунке 4.16.

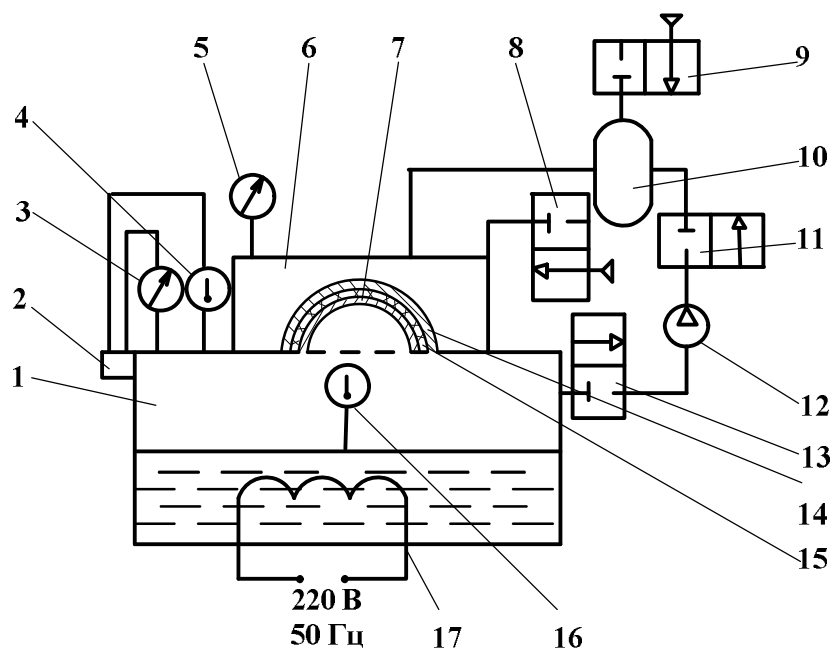


Рис. 4.16. Принципиальная схема установки

для гигротермического воздействия на заготовки верха обуви:

- 1 – нижняя вакуумная камера с водой; 2 – аппаратная часть экспериментальной установки;
 3, 5 – датчики давления; 4, 16 – температурные датчики; 6 – верхняя камера;
 7 – перфорированные перегородка и пуансон; 8, 9 – клапан подачи воздуха;
 10 – аккумулятор воздуха; 11 – клапан откачки воздуха; 12 – вакуумный насос;
 13 – соединительный клапан; 14 – воздухонепроницаемая плёнка; 15 – образец кожи; 17 – ТЭН

В состав установки входят верхняя 6 и нижняя 1 вакуумные камеры общим объёмом $0,09 \text{ м}^3$, которые разделены перфорированными перегородкой и пуансоном 7, на который надевается образец кожи 15 и затем герметизируется от верхней камеры воздухонепроницаемой плёнкой 14.

Вакуумирование нижней камеры осуществляется вакуумным насосом 12 (типа 2НВР-5ДМ, производительностью 5 л/с, с давлением на выходе от атмосферного до 0,02 МПа, мощностью электродвигателя 0,55 кВт) через золотник управления 13. Откачиваемый воздух собирается в аккумуляторе воздуха 10 и подаётся в верхнюю камеру для дополнительной фиксации, осуществляемой по мере необходимости.

Нагрев воды внутри нижней камеры осуществляет трубчатый электронагреватель 16 (ТЭН мощностью 1 кВт). Напряжение, подаваемое на ТЭН, регулировалось в схеме аппаратной части экспериментальной установки 2 (рис. 4.3).

Пар к образцам при исследовании процессов гигротермического воздействия поступал при испарении подогреваемой воды, находящейся в нижней части камеры. после предварительного вакуумирования нижней камеры до 0,02 МПа.

На рисунке 4.17 приведён общий вид экспериментальной установки.

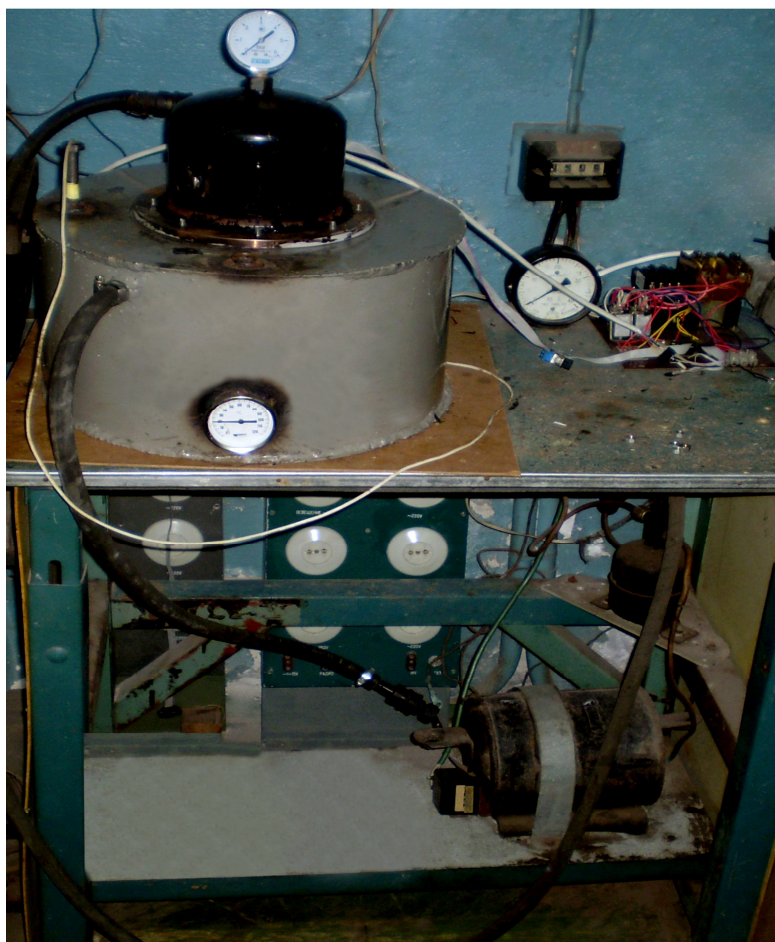


Рис. 4.17. Общий вид экспериментальной установки для гигротермической обработки

Соотношения между температурой и давлением [133] представленные в виде графика, приведённого на рисунке 4.5, поддерживались автоматически: при увлажнении $T = 2028 \cdot P^{0,31}$; при сушке $T > 2028 \cdot P^{0,31}$; при ВТО $T < 2028 \cdot P^{0,31}$.

4.5.3. Методика экспериментальных исследований влияния режимов гигротермической обработки заготовок верха обуви в условиях вакуума на показатели физико-механических свойств, определяющих формустойчивость кож хромового дубления

4.5.3.1. Методика экспериментальных исследований режимов гигротермической обработки заготовок верха обуви в условиях вакуума

На описанной выше установке осуществлялись следующие экспериментальные исследования:

1. Гигротермическая обработка, включающая операции увлажнения, фиксации, сушки, влажно-тепловой обработки при их последовательном проведении в условиях вакуума с использованием неперфорированных пуансонов и гигротермическим воздействием с лицевой стороны заготовок.

2. Гигротермическая обработка, включающая операции увлажнения, фиксации, сушки, влажно-тепловой обработки при их последовательно-параллельном проведении в условиях вакуума с использованием перфорированных пуансонов и гигротермическим воздействием с бахтармянной стороны заготовок.

Методика проведения экспериментальных исследований по пункту 1 предусматривает:

– увлажнение в вакууме образцов кож при их подвешивании в камере в течение 6 минут, начальных давлении 0,02 МПа и температуре 328 °К, определённых в качестве оптимальных в разделе 4.3;

– выемку из камеры и установку на неперфорированном пуансоне;

– фиксацию заготовки на неперфорированном пуансоне с приложением усилия в 200 Н (рекомендуемое усилие при испытаниях на релаксометре Н.Ф. Воронова) и выдержка при нагрузке в течение 5 минут;

– установку заготовки на неперфорированном пуансоне в камеру;

- сушку заготовки на неперфорированном пуансоне с предварительным вакуумированием камеры до давления 0,02 МПа и подачей пара с лицевой стороны в течение 6 минут до достижения температуры от 338 до 348 °К [167];

- выемку из камеры на 5 минут;

- установку заготовки на неперфорированном пуансоне в камеру и влажно-тепловую обработку с предварительным вакуумированием камеры до давления 0,02 МПа и подачей пара с лицевой стороны в течение 2-х минут, до достижения температуры от 330 до 340 °К [167].

Методика проведения экспериментальных исследований по пункту 2 предусматривает:

- установку заготовки на пустотелую перфорированную колодку;

- герметизацию колодки с заготовкой путём размещения на поверхности заготовки воздухонепроницаемой плёнки;

- установку колодки с заготовкой и воздухонепроницаемой плёнкой в камеру;

- влажно-тепловую фиксацию заготовки на перфорированном пуансоне изнутри, вакуумом и паром, с параллельным приложением давления откачиваемой паровоздушной среды к воздухонепроницаемой плёнке до достижения усилия в 200 Н (рекомендуемое усилие при испытаниях на релаксометре Н.Ф. Воронова), поддерживая его в течение времени достижения давления в нижней части камеры в 0,05 МПа и температуры 348 °К, т.е. совмещая фиксацию с сушкой. После чего заготовка вакуумируется с бахтармянной стороны для достижения давления 0,04 МПа, а температура пара снижается до 340 °К, т.е. производится влажно-тепловая обработка [68];

- выемку заготовки на перфорированном пуансоне.

4.5.3.2. Методика испытаний заготовок верха обуви после гигротермической обработки в условиях вакуума на формоустойчивость

Во всех экспериментальных исследованиях эффективность гигротермической обработки, проводимой с использованием неперфорированного и

перфорированного пуансонов, оценивалась величинами полных и остаточных деформаций при испытаниях на двухосное растяжение [27, 108].

При испытаниях образцов кож на формоустойчивость использовался многоосный релаксметр конструкции Н.Ф. Воронова [25], который в наибольшей степени соответствует условиям формования вытяжкой [149]. Принципиальная схема многоосного релаксметра конструкции Н.Ф. Воронова, осуществляющего формование вытяжкой плоского образца сферическим пуансоном, приведена на рисунке 4.18.

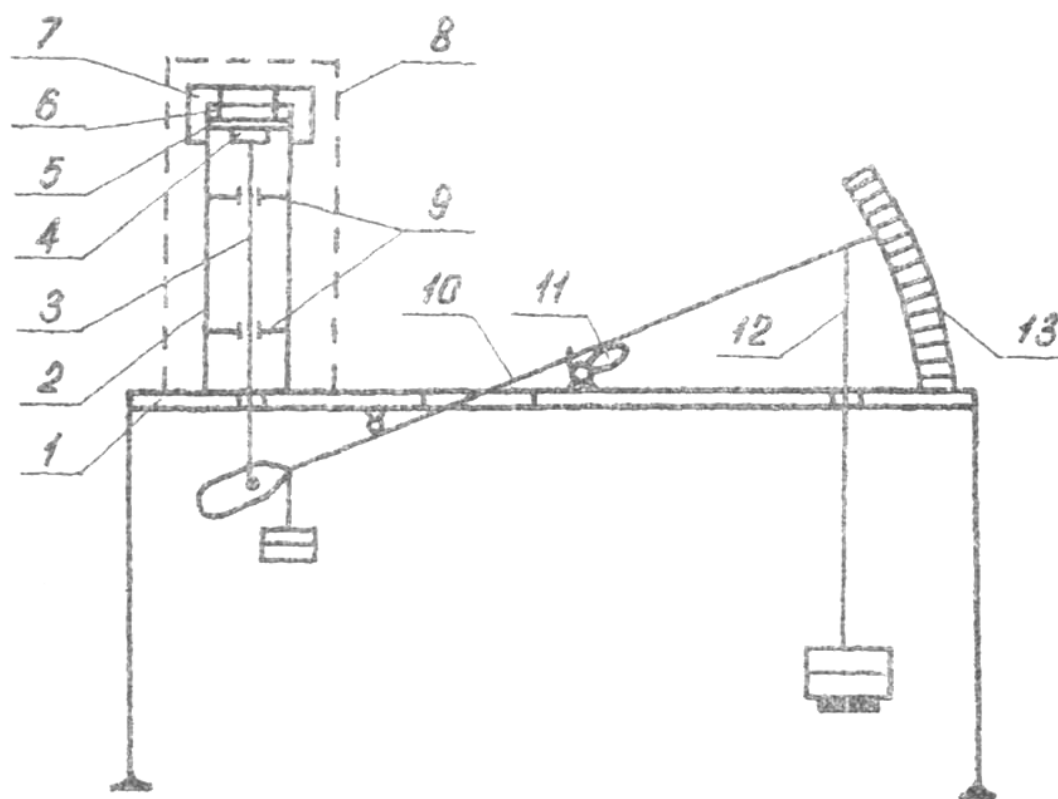


Рис. 4.18. Принципиальная схема многоосного релаксметра конструкции Н.Ф. Воронова:

- 1 – основание; 2 – стакан; 3 – шток; 4 – полусфера; 5 – образец; 6 – шайба;
7 – кольцо; 8 – термокамера; 9 – направляющие; 10 – рычаг; 11 – стопор;
12 – подвеска для грузов; 13 – шкала; 14 – противовес; 15 – кулиса

При испытаниях образцы материалов, приведённые к стандартному воздушно-сухому состоянию, увлажнялись сорбционным и вакуумно-сорбционным способом. После чего каждый образец закреплялся после выемки из камеры на стакане многоосного релаксметра 2 с помощью шайбы 6 и прижимного кольца 7 (рис. 4.18). На него посредством рычага 10 и полу-

сферы 4 оказывала действие постоянная нагрузка в 200 Н в течение 5 минут, при которой образец максимально растягивался по площади, т.е. формовался вытяжкой. Отформованный образец, сушился при температуре 65–70 °С в течение 5-ти минут, после чего подвергался влажно-тепловой обработке в камере в течение 2-х минут.

Для определения величин деформаций образцы выкраивались в виде кругов диаметром 100 мм, на них наносились концентрические окружности диаметром 40 и 60 мм [108].

Полные $\Delta_{\text{полн}}$ и условно остаточные $\Delta_{\text{ост}}$ деформации определялись сразу после снятия нагрузки и через 0,5; 1; 2; 24 часа по нижеприведённым формулам (4.16), (4.17) [27, 108]:

$$\Delta_{\text{полн}} = 100 (S_1 - S_0) / S_0, \quad (4.16)$$

$$\Delta_{\text{ост}} = 100 (S_i - S_1) / S_1, \quad (4.17)$$

где S_0 – первоначальная площадь образца, мм²;

S_1 – рабочая площадь максимально растянутого образца, мм²;

S_i – рабочая площадь образца после прекращения действия нагрузки и отдыха, мм².

Для сопоставимости результатов исследований размеры неперфорированного и перфорированного пуансонов были одинаковыми.

4.5.4. Расчёт технологических параметров экспериментальной установки для гигротермической обработки

4.5.4.1. Определение массы насыщенного пара в нижней камере экспериментальной установки

Массу влаги, находящуюся в заданном объёме камеры определяли, используя закон Клапейрона – Менделеева [6, 171], который применим для газов в разреженном состоянии, по формуле:

$$P \cdot V_K = \frac{m}{\mu} R \cdot T, \quad (4.18)$$

откуда масса пара равна:

$$m = \frac{P \cdot V_K \cdot \mu}{R \cdot T}, \quad (4.19)$$

где μ – молярная масса водяного пара, кг/К·моль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

P – среднее значение давления, Па;

V_K – объём рабочей камеры, м³;

T – среднее значение температуры, К.

Значения параметров, входящих в состав формулы 4.19 соответствуют условиям проведения опытов ($\mu = 8$ кг/К·моль, $R = 8,31$ Дж/(моль·К), $P = 36250$ Па, $V_K = 0,09$ м³, $T = 330$ К) [173].

Требуемая для увлажнения масса водяного пара равна:

$$m = \frac{36250 \cdot 0,09 \cdot 18}{8310 \cdot 330} = 0,0214 \text{ кг}.$$

Таким образом, полученная масса пара должна находиться в принятом объёме рабочей камеры. Но так как процесс вакуумно-сорбционного увлажнения осуществляется до достижения равновесного состояния среды и кожи, то масса влаги удваивается и составляет 0,0428 г, так как количество находящейся в камере влаги должно быть равно количеству влаги, поглощённому заготовкой верха обуви.

4.5.4.2. Расчёт парогенератора

При реализации универсального способа гигротермической фиксации, включающего вакуумирование внутренней полости колодки до давления $P = 0,02$ МПа и нагрев воды до температуры $t = 60$ °С для получения насыщенного влажного пара требуется рассчитать расход теплоты на его производство.

Удельная теплота парообразования $C_{\text{по}}$ при нормальном атмосферном давлении и заданной температуре составляет 2400 КДж·К/кг [171], а при давлении 0,02 МПа эта величина соответственно составит $2400/5 = 480$ КДж·К/кг.

Расход теплоты на производство пара в камере объёмом $V_K = 0,09 \text{ м}^3$, содержащем 0,0428 кг влаги, в течение 1 минуты, равен 20,54 кДж.

Мощность нагревания в кВт для получения пара при заданных условиях при количестве циклов гигротермической фиксации, равном шести в час, составит:

$$N_{\Sigma} = 20,54 \cdot 0,1 = 2,05 \text{ кВт}.$$

4.5.4.3. Определение перепада давления для прижатия заготовки к колодке

Расчёт давления внутри рабочей камеры необходим для того, чтобы усилие прижатия заготовки к колодке составляло 200 Н, в соответствии с условиями определения показателей формоустойчивости на релаксометре Н.Ф. Воронова [25].

Давление прижатия определяется по формуле:

$$P = \Delta p \cdot F \cdot f_n, \quad (4.20)$$

где Δp – перепад давлений нижней и верхней части камеры, МПа;

f_n – коэффициент перфорации пуансона, который равен 0,47;

F – площадь поверхности пуансона через которую отсасывается воздух.

Перепад давлений определяется по формуле:

$$\Delta p = \frac{P}{F},$$

где F – площадь, через которую отсасывается воздух, равная площади пуансона с учётом коэффициента перфорации.

$$\Delta p = \frac{P}{F} = \frac{200}{0,0035 \cdot 0,472} = 57500 \text{ Па} = 0,05 \text{ МПа}.$$

Перепад давлений в верхней и нижней частях камеры для создания усилия $P=200 \text{ Н}$ составит $\Delta p=0,05 \text{ МПа}$. 4.6.

4.6 Результаты исследования влияния параметров процесса интенсифицированной гигротермической обработки на показатели физико-механических свойств кож хромового дубления, характеризующих формоустойчивость

4.6.1. Экспериментальные исследования влияния параметров сушки в условиях вакуума

Экспериментальные исследования влияния параметров сушки в условиях вакуума проводились в соответствии с методикой, приведённой в разделе 4.5.3.1, при установке увлажнённых и отформованных заготовок на неперфорированном и перфорированном пуансонах в вакуумную камеру. Графические зависимости, построенные в результате экспериментальных исследований, приведены на рисунке 4.19.

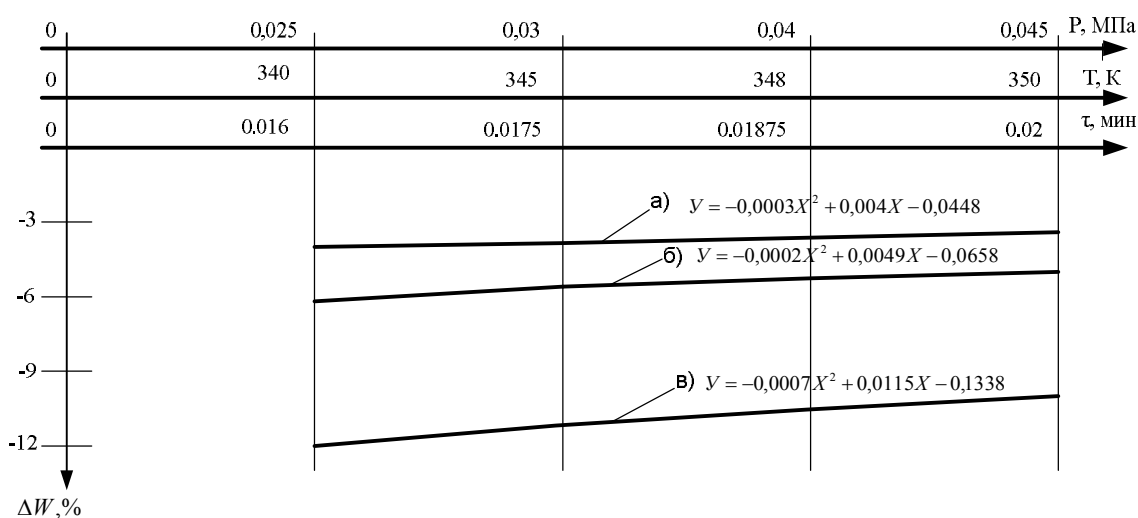


Рис. 4.19. Зависимости относительной влажности кож хромового дубления от времени сушки в условиях вакуума

после вакуумно-сорбционного увлажнения:

- а) на неперфорированном пуансоне; б) на перфорированном пуансоне;
- в) после сорбционного увлажнения на неперфорированном пуансоне

Как следует из анализа полученных графических зависимостей, количество удалённой из образцов влаги после различных способов увлажнения и способов подвода тепла при сушке существенно отличается. В обоих случаях

наиболее интенсивное её удаление наблюдается в первые 4 минуты. Причём количество удаляемой влаги после вакуумно-сорбционного увлажнения не превышает 4–6 % и практически не изменяется при дальнейшем увеличении времени сушки. После сорбционного увлажнения количество удаляемой влаги составляет 10–12 % при аналогичных условиях сушки. Такое отличие показателей свидетельствует о различном характере конденсации влаги в структуре кожи после сорбционного и вакуумно-сорб-ционного увлажнения и доказывает положение гипотезы об образовании новых связей в структуре кожи с более высоким потенциальным барьером после вакуумно-сорбционного увлажнения. Образованные связи не разрушаются при повторном воздействии тепла, подводимого к заготовкам при сушке в условиях вакуума.

4.6.2. Экспериментальные исследования влияния параметров влажно-тепловой обработки в условиях вакуума

Экспериментальные исследования влияния параметров влажно-тепловой обработки в условиях вакуума проводились в соответствии с методикой, приведённой в разделе 4.5.3.1, при установке увлажнённых, отформованных и высушенных заготовок на перфорированном и неперфорированном пуансонах в вакуумную камеру. Графические зависимости, построенные в результате экспериментальных исследований, приведены на рисунке 4.20.

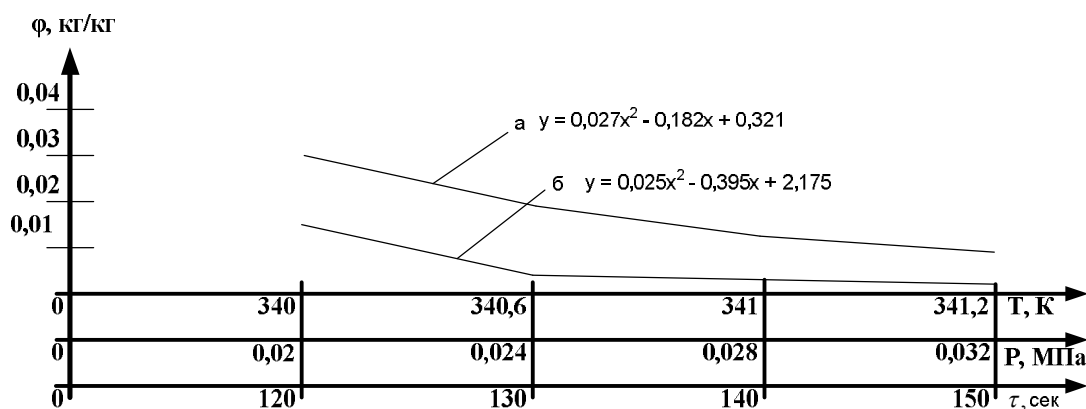


Рис. 4.20. Зависимости относительной влажности кож хромового дубления от времени влажно-тепловой обработки в условиях вакуума:
а) на неперфорированном пуансоне; б) на перфорированном пуансоне

Как следует из приведённых графических зависимостей (рис. 4.20), наибольший привес влаги при влажно-тепловой обработке в условиях вакуума наблюдался в первые 120–130 секунд обработки и при подаче пара с бахтармянной и с лицевой сторон заготовок, находящихся на перфорированном пуансоне. А так как при влажно-тепловой обработке заготовок верха обуви достигается снижение внутренних напряжений в материале без существенного изменения его влагосодержания, то в обоих случаях этот привес влаги находился в пределах 2-3 %. Затем за счёт теплоты сорбции происходит повышение температуры кожи, способствующее сушке и интенсивному снижению уровня внутренних напряжений (в результате происходит улучшение условий протекания релаксации напряжения).

4.6.3. Экспериментальные исследования влияния параметров интенсифицированной гигротермической обработки в условиях вакуума на остаточные деформации кож хромового дубления

Остаточные деформации образцов после гигротермической обработки, формования в условиях двухосного растяжения и времени релаксации напряжений – «отдыха» являются показателями, характеризующими формоустойчивость.

Численные значения этих деформаций представлены в таблице 4. 16.

Таблица 4.16 – Значения полных и остаточных деформаций при двухосном растяжении кожи хромового дубления в зависимости от способов и времени обработки

Показатели	Гигротермическая обработка на неперфорированном пуансоне после различных способов увлажнения в течение времени:				
	без вакуума	в вакууме			
	30 мин.	2 мин.	4 мин.	6 мин.	8 мин.
Привес влаги, %	12 ± 0,6	7 ± 0,4	10 ± 0,5	16 ± 0,8	9 ± 0,5
Полная деформация при нагрузке 200 Н, %	25,0 ± 1,6	24,8 ± 1,2	28,8 ± 1,4	30,9 ± 1,5	24,8 ± 1,2
Остаточная деформация, %: после снятия нагрузки	18,2 ± 1,1	23,3 ± 1,2	23,7 ± 1,2	24,3 ± 1,2	21,8 ± 1,2
через 30 минут	13,8 ± 0,9	22,3 ± 1,1	22,3 ± 1,1	23,0 ± 1,1	20,0 ± 1,0
через 1 час	13,2 ± 0,9	19,6 ± 1,0	16,4 ± 0,08	21,0 ± 1,0	17,4 ± 0,8
через 2 часа	12,6 ± 0,8	18,1 ± 0,9	16,4 ± 0,8	19,3 ± 1	17,4 ± 0,8
через 24 часа	11,6 ± 0,7	15,3 ± 0,7	16,1 ± 0,8	19,0 ± 1	16,0 ± 0,8

Полученные экспериментально значения полных деформаций при нагрузке 200 Н для образцов из кожи хромового дубления, обработанных без вакуума, в 1,5–2 раза ниже показателей образцов, обработанных с применением вакуума, что свидетельствует о лучшей формуемости последних. По-видимому, это связано с решающим влиянием характера распределения влаги, адсорбируемой микрокапиллярами при гигротермической обработке в условиях вакуума.

Анализ характера изменения остаточных деформаций от времени «отдыха» после двухосного растяжения образцов кож хромового дубления свидетельствует о том, что имеется определённое значение времени вакуумно-сорбционного увлажнения (6 минут), при котором остаточные деформации имеют максимальные значения и, следовательно, минимальные остаточные напряжения. Дальнейшее увеличение времени увлажнения до 8 минут приводит к резкому спаду остаточных деформаций.

Так, при обработке без вакуума остаточная деформация через 24 часа составляет для кож 11,6 %, при гигротермической обработке после вакуумно-сорбционного увлажнения в течение 6 минут – 19,0 %, что свидетельствует о значительном снижении остаточных напряжений.

К образцам, установленным на перфорированном пуансоне, параллельно с вакуумированием и увлажнением с бахтармянной стороны прилагалось усилие. Это усилие создавалось за счёт перепада давления паровоздушной среды с внешней стороны пуансона с образцом кожи и воздухопроницаемой плёнкой и вакуума, действующего на них изнутри, до подъёма давления в нижней части камеры, изолированной от верхней воздухо непроницаемой плёнкой, до 0,05 МПа при температуре сушки 348 °К. Влажно-тепловая обработка проводилась в течение 2-х минут после снижения давления в нижней части камеры до 0,02 МПа и температуры до 330 °К.

Таблица 4.17 – Значения полных деформаций кож хромового дубления в зависимости от усилия формования в условиях вакуума на перфорированном пуансоне

Давление прижатия P_{Π} , МПа	Расчётный перепад давлений ΔP , МПа	Среднее значение полной деформация $\Delta_{\text{полн.}}$, %	Расчётное усилие формования $P_{\text{ус.}}$, Н
0,2	0,15	56,8±1,3	551
0,15	0,10	41,7±0,9	376
0,1	0,05	28,4±1,1	201,25

Как следует из приведённых данных (табл. 4.17), значения полной деформации в зависимости от способа формования после снятия нагрузки для образцов, увлажнённых вакуумно-сорбционным способом, в зависимости от времени увлажнения различны. Так, при 6 минутах увлажнения значение полной деформации максимальное, что свидетельствует о лучшей формуемости при влажно-тепловой фиксации на перфорированном пуансоне.

Значения остаточных деформаций образцов кож хромового дубления, отформованных с использованием вакуума и давления на перфорированном пуансоне и зафиксированных через 24 ч, приведены в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Значения остаточных деформаций кож хромового дубления в зависимости от времени увлажнения в вакууме на перфорированном пуансоне

Давление прижатия P_{Π} , МПа	Расчётный перепад давлений ΔP , МПа	Среднее значение полной деформации $\Delta_{\text{полн.}}$, %	Расчётное усилие формования $P_{\text{ус.}}$, Н	Время τ , час	Остаточная деформация, $\Delta_{\text{ост.}}$, %
0,2				0,5	50±0,9
				1	48±1,2
				2	45±1,1
	0,15	56,8±1,3	551,2	24	45±1,1
0,15				0,5	37,5±0,9
				1	36,0±1,0
				2	33,3±1,2
	0,1	42,7±0,9	378,25	24	33,3±0,9
0,1				0,5	26,3±1,3
				1	25,2±1,0
				2	23,6±1,3
	0,05	28,47±1,1	201,2	24	23,6±1,0

Построенные по полученным данным графические зависимости показаны на рисунке 4.21.

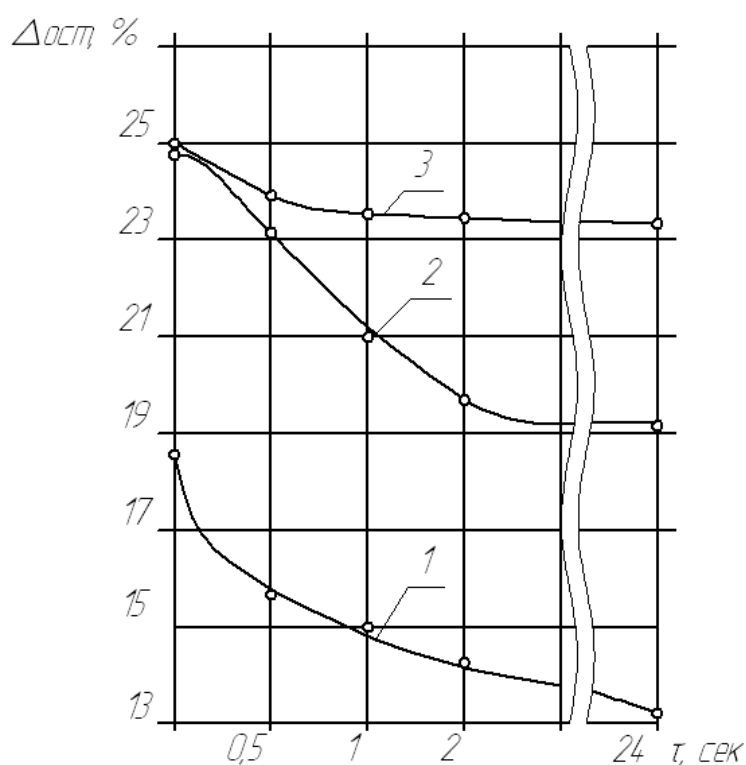


Рис. 4.21. Зависимости остаточных деформаций кожи хромового дубления при двухосном растяжении от времени «отдыха» после гигротермической обработки:

1 – обработка без вакуума; 2 – обработка в вакууме на неперфорированном пуансоне;
3 – обработка в вакууме на перфорированном пуансоне

В таблице 4.19 приведены виды функций, аппроксимирующих опытные данные, значения эмпирических коэффициентов и коэффициентов корреляции.

Таблица 4.19 – Результаты аппроксимации кривых изменения остаточных деформаций при двухосном растяжении в зависимости от времени «отдыха»

Способ обработки кож хромового дубления	Вид аппроксимируемой функции	Значения коэффициентов			
без вакуума	$Y = A+B/(x+C)$	12,3	0,54	0,04	0,90
в вакууме:					
на неперфорированном пуансоне,	$Y = A+Bx$	25,9	-3,0	-	0,78
на перфорированном пуансоне	$Y=Ax^2-Bx+C$	0,25	-1,95	26,75	0,98

Таким образом, на основании анализа результатов экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

–максимальный привес влаги в кожах хромового дубления и системе «кожа + тик-саржа» при вакуумно-сорбционном увлажнении был достигнут

при испарении подогретой воды с открытой поверхности ёмкости, установленной внутри камеры;

– значения привесов влаги в коже хромового дубления, полученные экспериментально при различной длительности вакуумно-сорбционном увлажнении, отличаются от рассчитанных не более чем на 20 %, что свидетельствует об адекватности реального процесса и полученных моделей;

– установлено практически полное совпадение кривых увлажнения кож хромового дубления различной выработки (только хромового дубления, додубленных синтанами и наполненных полимерами) при вакуумно-сорбционном увлажнении в исследуемом промежутке времени, что придаёт особую значимость при использовании на обувных предприятиях, обеспечивая одинаковый привес влаги в заготовках обуви независимо от способов выработки кож;

– после вакуумно-сорбционного увлажнения физико-механические показатели кож хромового дубления для подкладочной и бесподкладочной обуви, системы материалов «кожа + тик-саржа», полученные при одно- и двухосном растяжении, предопределяющие формуемость, повышаются в 1,5–2 раза при практически неизменных значениях предела прочности при растяжении, исключая возможность разрыва заготовки верха обуви при проведении обтяжно-затяжных операций. При этом время обработки уменьшается более чем в 5 раз по сравнению с традиционным способом, а наилучшие физико-механические показатели наблюдались при времени увлажнения в течение 6-ти минут.

4.7. Определение оптимальных режимов вакуумно-сорбционного увлажнения перед формованием деталей верха обуви

В предыдущих главах были выявлены основные закономерности механизма влагопереноса при вакуумно-сорбционном увлажнении, а также особенности изменения физико-механических свойств исследуемых материалов после вакуумного увлажнения при различных параметрах процесса.

Однако, в связи с особенностями влагопереноса при увлажнении в вакууме, оптимальная относительная влажность кож после увлажнения может несколько отличаться от рекомендуемой типовыми технологиями [152] относительной влажности кожи ($25 + 3 \%$). Так, из проведённых исследований следует, что изменение физико-механических свойств кожи хромового дубления для верха обуви происходит не только в зависимости от их относительной влажности после увлажнения, но и от продолжительности увлажнения. То есть при одной и той же относительной влажности кожи, но полученной за разные промежутки времени вакуумно-сорбционного увлажнения, показатели физико-механических свойств увлажнённой кожи не однозначны.

На современном уровне развития науки и техники аналитически рассчитать показатели исследуемых после увлажнения материалов, предопределяющие формуемость и поведение материалов при обтяжно-затяжных операциях (остаточную деформацию, условный модуль упругости и др.) с учётом толщины, анизотропии свойств кожи, количества слоёв в системах верха, не представляется возможным [34]. Невозможно в настоящее время определить теоретическим путём и влияние факторов процесса вакуумно-сорбционного увлажнения на указанные свойства кожи и материалов пакета.

Поэтому возникла необходимость экспериментально установить оптимальные соотношения режимных параметров и технологических особенностей исследуемых материалов, обеспечивающих требуемые значения показателей физико-механических свойств.

Эффективность использования вакуумно-сорбционного увлажнения зависит от многих факторов – конструктивных, технологических, экономических и др. Комплексный учёт всех варьируемых переменных позволит найти вариант технического решения с наилучшими значениями выходных характеристик.

Для решения этих вопросов требуется применение современных экспериментально-статистических методов, обеспечивающих решение оптимизационных задач при минимально возможном числе опытов, затратах времени и средств. В связи с этим предполагается решение многофакторной оптими-

зационной задачи с помощью методов теории планирования экспериментов [153].

Объектом экспериментального исследования являются факторы вакуумно-сорбционного процесса увлажнения, реализуемого на стенде, порядок работы которого и методика испытаний приведены выше в разделе 4.1. В качестве основных критериев оптимизации выбраны величины остаточной деформации и условного модуля упругости и соответствующие их оптимальным значениям величины относительной влажности.

Достижение требуемой по технологическому процессу величины оптимальной относительной влажности заготовок обуви, обеспечивающей оптимальные значения остаточной деформации и модуля упругости, зависит от большого числа переменных факторов параметров увлажнения, геометрических характеристик рабочей камеры вида и характера обработки кожи, количества и способа соединения слоёв в заготовке обуви.

Из анализа данных; приведённых в вышеуказанных работах, можно установить следующие факторы, влияющие на величину относительной влажности, достигаемой при вакуумно-сорбционном способе увлажнения: время увлажнения – X_1 , начальное остаточное давление – X_2 , число слоёв в обувной заготовке – X_3 , расположение заготовки относительно хребта – X_4 , температура паровоздушной среды – X_5 , относительная влажность паровоздушной среды – X_6 , метод выработки кожи – X_7 , объём рабочей камеры – X_8 , скорость истечения пара – X_9 , вид покрытия кожи – X_{10} , способ соединения материалов в заготовке – X_{II} .

С целью определения основных факторов было проведено априорное ранжирование [153], учитывающее мнение специалистов в области увлажнения обувных материалов [134, 136].

Матрица рангов, составленная в результате опроса с помощью анкеты, приведена в таблице 4.20. Из диаграммы на рисунке 4.22 видно, что распределение – равномерное, убывание – немонотонное.

Таблица 4.20 – Матрица рангов априорного ранжирования факторов вакуумно-сорбционного процессов увлажнения

Исследователи (m)	Факторы											$T_j = \sum (t_j^5 - t_j)$
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	
1	1,5	1,5	3	4,5	9	4,5	6,0	10,5	10,5	8,0	7,0	18
2	1	2	3,5	3,5	11	8	10	9	7	5,5	5,5	6
3	1,5	3	4	1,5	5	10	11	8	9	6,5	6,5	12
4	1	2	4	5	8	3	9	10,5	10,5	6	7	6
5	3	1	2	4	8	5	11	9,5	9,5	6,5	6,5	12
$\sum_{i=1}^m = a_{ij}$	8	9,5	16,5	18,5	41	30,5	47	47,5	46,5	32,5	32,5	$\sum_1^m T_j = 54$
Δi	-22	-20,5	-13,5	-11,5	11	0,5	17	17,5	16,5	2,5	2,5	
$(\Delta i)^2$	484	420,25	182,25	132,25	121	0,25	289	306,25	272,25	6,25	6,25	S= 2220

$$\text{Коэффициент конкордации: } W = \frac{12 \cdot S}{m^2(k^3 - k) - m \sum_{i=1}^m T_j}$$

$$W = \frac{12 \cdot 2220}{25(1331 - 11) - 5 \cdot 54} = 0,814.$$

$$\text{Критерий Пирсона: } X_p^2 = \frac{12S}{mk(k+1) - \frac{1}{k-1} \sum T_j} = 68,2 \quad X_{0,04}^2 = 18,31 \quad X_p^2 > X_{0,04}^2$$

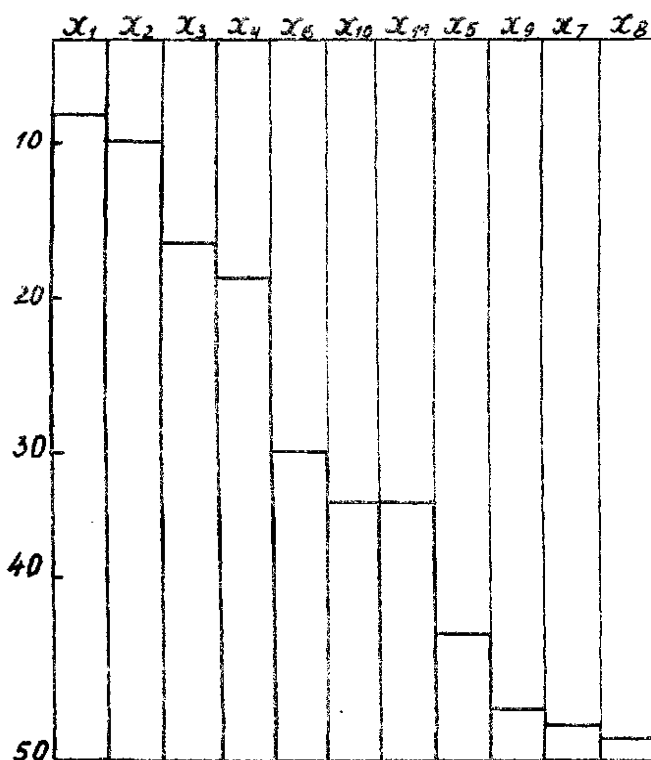


Рис. 4.22

Рис. 4.22. Диаграмма распределения факторов

По результатам проведённого эксперимента было отобрано для дальнейшего исследования четыре фактора, занимающих на диаграмме четыре первых места.

Целью исследований, проведённых на следующем этапе, было получение модели, адекватной поведению исследуемых материалов при формовании.

В качестве параметров оптимизации вакуумно-сорбционного увлажнения были выбраны: относительная влажность (Y_1), остаточная деформация при напряжении 10 МПа (Y_2) и условный модуль упругости (Y_3) увлажняемых материалов.

Интервалы и уровни варьирования основных факторов были выбраны после проведения серии предварительных опытов и составили: время увлажнения – 2, 4, 6 минут; начальное остаточное давление 0,02, 0,06, 0,1 МПа; число слоёв в обувной заготовке 1, 2, 3; расположение заготовок относительно хребта – 90°, 135°, 180°.

Количественные значения остальных факторов были выбраны с учётом предварительных исследований, результаты которых приведены в разделе 4.3.

В таблице 4.21 приведены уровни варьирования основных факторов.

Таблица 4.21 – Уровни варьирования основных факторов вакуумно-сорбционного процессов увлажнения

№ п/п	Исследуемая характеристика	Фактор	Уровни варьирования			Интервал варьирования
			+1	0	-1	
1	Время увлажнения τ , минут	X_1	2	4	6	2
2	Начальное остаточное давление p , МПа	X_2	0,02	0,06	0,1	0,04
3	Количество слоёв, n	X_3	1	2	3	1
4	Расположение заготовок по отношению к хребту α , °	X_4	90	135	180	45

Обработка результатов экспериментов проводилась на ЭВМ с применением стандартных программ. Соответствующие расчётные формулы для нахождения оценок коэффициентов в уравнении регрессии брались из работы [153].

Таблица 4.22 – Матрица планирования и результаты экспериментов

№ п/п	Факторы				Средние значения параметров оптимизации (по 5 повторениям)		
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	$\bar{Y}_1(W, \%)$	$\bar{Y}_2(E_{OCT})$	$\bar{Y}_3(E_Y)$
1	+1	+1	+1	+1	34,4	18,0	2,82
2	+1	-1	+1	+1	24,9	4,60	4,00
3	-1	+1	+1	+1	33,3	22,8	1,70
4	-1	-1	+1	+1	29,1	15,2	2,24
5	+1	+1	-1	+1	28,2	5,4	6,34
6	-1	+1	-1	+1	31,3	9,8	5,66
7	+1	-1	-1	+1	23,8	9,2	7,48
8	-1	-1	-1	+1	30,0	13,8	5,90
9	+1	+1	+1	-1	33,1	14,0	4,00
10	-1	+1	+1	-1	37,8	16,4	2,94
11	+1	-1	+1	-1	23,5	12,6	4,82
12	-1	-1	+1	-1	29,5	13,2	3,76
13	+1	+1	-1	-1	22,9	4,8	8,36
14	-1	+1	-1	-1	27,1	6,2	8,04
15	+1	-1	-1	-1	26,7	11,2	7,19
16	-1	-1	-1	-1	27,7	11,0	5,60

В результате расчётов коэффициентов регрессии и оценки их значимости получены следующие математические модели:

$$Y_1 = 28,931 - 0,694x_1 + 0,984x_2 + 1,724x_3 + 1,119x_1x_3 + 1,306x_1x_4 + 0,796x_2x_3 - 0,701x_2x_4 - 0,726x_3x_4$$

$$Y_2 = 11,762 - 0,488x_1 + 1,863x_2 + 2,837x_3 + 0,588x_4 + 1,763x_1x_3 + 1,013x_1x_4 + 0,512x_2x_3 - 1,038x_2x_4$$

$$Y_3 = 4,855 - 0,338x_1 + 0,415x_2 + 1,570x_3 + 0,587x_4 + 0,227x_1x_2 + 0,288x_1x_3 - 0,260x_2x_3$$

Адекватность полученных моделей реальным процессам проверилась с помощью критерия Фишера, расчётные значения которого во всех трёх случаях значительно превышают табличные значения [153].

$$F_{T1} = 17,7 > F_{PAC} = 2,53; \quad F_{TABL} = 16,5 > F_{PAC} = 2,03;$$

$$F_{T1} = 9,87 > F_{PAC} = 2,53;$$

Таким образом, полученные линейные модели неадекватны рассматриваемым процессам, поэтому возникает необходимость в построении моделей в виде полиномов второй степени.

В связи с этим необходимо перейти к планированию, которое связано с варьированием факторов на пяти уровнях. Так как рассмотренные ранее та-

кие факторы, как «количество слоёв» и «расположение заготовок по отношению к хребту», разбить на пять уровней не представляется возможным, то при ротатабельном планировании второго порядка матрица, приведённая в таблице 4.16, разбивается на две других: одна для кожи хромового дубления, другая – для системы «кожа + тик-саржа». Причём в обоих случаях образцы из кожи выкраивались под углом 135° к хребту. Полученные матрицы представлены в таблицах 4.23, 4.24.

Таблица 4.23 – Уровни варьирования факторов для кожи хромового дубления

№ п/п	Исследуемая характеристика	Фактор	Уровни варьирования					Интервал варьирования
			-1,414	-1	0	+1	+1,414	
1	Время увлажнения τ , минут	X_1	1,2	2	4	6	6,8	2
2	Начальное остаточное давление p , МПа	X_2	0,002	0,01	0,03	0,05	0,058	0,02

Таблица 4.24 – Уровни варьирования факторов для системы «кожа+тик-саржа»

№ п/п	Исследуемая характеристика	Фактор	Уровни варьирования					Интервал варьирования
			-1,414	-1	0	+1	+1,414	
1	Время увлажнения τ , минут	X_1	1,8	4	6	8	8,8	2
2	Начальное остаточное давление p , МПа	X_2	0,002	0,01	0,03	0,05	0,058	0,02

Таблица 4.25 – Матрица планирования и результаты экспериментов для кожи хромового дубления

№ п/п	Факторы		Средние значения параметров оптимизации (по повторениям)		
	X_1	X_2	$\bar{Y}_1(W)$	$\bar{Y}_2(E_{ост})$	$\bar{Y}_3(E_Y \cdot 10)$
1	+1	+1	26,4	15,2	2,24
2	-1	+1	21,8	4,60	4,00
3	+1	-1	37,3	22,8	1,89
4	-1	-1	33,0	18,0	2,82
5	-1,414	0	27,9	16,8	2,86
6	+1,414	0	30,8	14,0	2,42
7	0	-1,414	36,9	27,0	1,34
8	0	+1,414	22,5	4,30	4,12
9	0	0	36,4	24,6	1,58
10	0	0	36,0	23,2	1,56
11	0	0	36,2	22,6	1,72
12	0	0	36,4	23,6	1,76
13	0	0	36,2	22,4	1,58

Таблица 4.26 – Матрица планирования и результаты экспериментов для системы «кожа +тик-саржа»

№ п/п	Факторы		Средние значения параметров оптимизации (по повторениям)		
	X ₁	X ₂	$\bar{Y}_1(W)$	$\bar{Y}_2(E_{ост})$	$\bar{Y}_3(E_Y \cdot 10)$
1	+1	+1	26,1	27,2	3,56
2	-1	+1	22,6	26,2	3,72
3	+1	-1	29,8	28,6	3,32
4	-1	-1	28,8	28,4	3,52
5	-1,414	0	23,6	25,4	3,82
6	+1,414	0	29,1	28,5	3,68
7	0	-1,414	29,0	29,2	3,60
8	0	+1,414	22,3	21,6	3,62
9	0	0	29,6	25,8	3,70
10	0	0	30,1	30,8	3,75
11	0	0	31,2	28,2	3,66
12	0	0	31,2	28,0	3,72
13	0	0	29,9	29,0	3,60

В результате расчётов коэффициентов регрессии и оценки их значимости получены следующие математические модели:

Для кожи хромового дубления

$$Y_1 = 36,224 - 0,540x_1 + 0,199x_2 + 0,08x_1x_2 - 13,412x_1^2 - 3,232x_2^2$$

$$F_{расч} = 2,72. \quad F_{табл} = 6,59. \quad F_{расч} < F_{табл}.$$

$$Y_2 = 23,28 + 2,42x_1 + 1,388x_2 + 1,450x_1x_2 - 4,034x_1^2 - 3,909x_2^2$$

$$F_{расч} = 2,66. \quad F_{табл} = 6,59. \quad F_{расч} < F_{табл}.$$

$$Y_3 = 1,64 - 0,258x_1 - 0,301x_2 - 0,209x_1x_2 + 0,513x_1^2 + 0,558x_2^2$$

$$F_{расч} = 3,16. \quad F_{табл} = 6,59. \quad F_{расч} < F_{табл}.$$

Для системы «Кожа +тик-саржа»

$$Y_1 = 30,41 - 0,410x_1 + 0,635x_1x_2 - 1,832x_1^2 - 2,167x_2^2$$

$$F_{расч} = 2,58. \quad F_{табл} = 6,59. \quad F_{расч} < F_{табл}.$$

$$Y_2 = 28,360 - 1,135x_2^2$$

$$F_{расч} = 0,35. \quad F_{табл} = 6,59. \quad F_{расч} < F_{табл}.$$

$$Y_3 = 3,723 + 0,051x_2 - 0,094x_2^2$$

$$F_{расч} = 6,18. \quad F_{табл} = 6,59. \quad F_{расч} < F_{табл}.$$

Все полученные математические модели адекватны исследуемым процессам с 95 % доверительной вероятностью.

Для решения полученных систем нелинейных уравнений использовался метод Ньютона в программе «Maple 9.5». Расчёты выполнены с шагом 1 в диапазонах: $\overline{Y}_1(W) = 25\text{--}40\%$; $\overline{Y}_2(E_{ост}) = 18\text{--}28\%$; $\overline{Y}_3(E_Y \cdot 10) = 22\text{--}30$ МПа [80].

Оптимальные значения режимов вакуумно-сорбционного увлажнения, обеспечивающие максимальные значения остаточной деформации при напряжении 10 МПа и минимальные значения условного модуля упругости, приведены таблице 4.27.

Таблица 4.27 – Оптимальные значения факторов процесса вакуумно-сорбционного увлажнения и соответствующие им значения критериев оптимизации

№ п/п	Исследуемая характеристика	Материалы	
		кожа хромового дубления	кожа + тик-саржа
1	Время увлажнения τ , минут	4	6
2	Начальное остаточное давление p , МПа	0,002–0,03	0,002–0,03
3	Остаточная деформация при напряжении 10 МПа $\epsilon_{ост}, \%$	27,0–22,0	29,2–26,0
4	Условный модуль упругости E_y 10, МПа	1,34–1,60	3,6–3,75
5	Относительная влажность W , %	36,0	29,0

Таким образом, для обеспечения максимальных значений остаточных деформаций (основной критерий), минимальных или близких к ним значений условного модуля упругости, параметры вакуумно-сорбционного способа увлажнения должны быть следующими: для кожи хромового дубления: время – 4 минуты, начальное остаточное давление – 0,002-0,03 МПа, значение относительной влажности – 36,0 %; для системы «кожа + тик-саржа» время – 6 минут; начальное разрежение – 0,002-0,03 МПа, $W = 29$ %.

Для получения выше рассмотренных уравнений регрессий второго порядка, устанавливающих взаимосвязь между выходными параметрами, характеризующими физико-механические свойства кож от всего двух факторов, учитываемых при вакуумно-сорбционном увлажнении: времени и остаточного давления в камере, необходимо проведение порядка 125 опытов, свя-

занное с варьированием этих факторов на пяти уровнях. В случае же рассмотрения большего количества факторов, связанных с проведением всех операций гигротермической обработки, при их совмещении количество проводимых опытов значительно возрастёт, поэтому требуются другие методы экспериментальных исследований, например, метода подобия функционирования технических систем [122, 123].

ВЫВОДЫ

1. Разработаны для экспериментальных исследований кинетики увлажнения конструкции специализированного стенда для вакуумно-сорбционного увлажнения свободно подвешенных в камере образцов и многофункционального стенда для гигротермической обработки образцов кож хромового дубления, установленных на перфорированном пуансоне.

2. Показана возможность применения вакуума при выполнении всего цикла ИГВ, включающего операции «увлажнение», «влажно-тепловая фиксация», «сушка», «влажно-тепловая обработка» при обработке кож хромового дубления с применением перфорированных пуансонов и систем материалов с применением неперфорированных пуансонов.

3. Установлена адекватность реального процесса ИГВ вакуумно-сорбционного увлажнения и полученных математических моделей для кож различных толщин и выделки.

4. Установлено, что в случае проведения всего цикла ИГВ, включающего операции «увлажнение», «влажно-тепловая фиксация», «сушка», «влажно-тепловая обработка» заготовок, установленных на перфорированном пуансоне, операция «основная сушка» после выемки из камеры может быть исключена. Это подтверждает гипотезу о влиянии влаги, сконденсированной в микрокапиллярах в условиях вакуума и способствующей образованию новых связей между цепями в структуре коллагена с более высоким потенциальным

барьером, приводящим к фиксации структуры кожи в новом зафиксированном состоянии.

5. Экспериментально подтверждено влияние микрокапиллярной влаги на изменение физико-механических показателей кож хромового дубления для подкладочной и бесподкладочной обуви, систем материалов «кожа + тик-саржа». Показатели предопределяющие формуемость, полученные при одно- и двухосном растяжении, повышаются в 1,5–2 раза при использовании вакуумно-сорбционного способа увлажнения при практически неизменных значениях предела прочности при растяжении, исключая возможность разрыва заготовки верха обуви при проведении обтяжно-затяжных операций. При этом время вакуумно-сорбционного увлажнения уменьшается более чем в пять раз по сравнению с традиционным способом.

6. Установлены эмпирические зависимости основных показателей физико-механических свойств кож хромового дубления для подкладочной и бесподкладочной обуви, систем материалов «кожа + тик-саржа».

7. Экспериментально определена степень влияния режимов ИГВ при вакуумно-сорбционном увлажнении. Показано преобладающее влияние двух из них: времени увлажнения и остаточного давления на показатели физико-механических свойств кож.

8. Показана невозможность учёта большего числа факторов, влияющих на показатели физико-механических свойств кож, в одной универсальной математической модели, полученной на основе регрессионного анализа.

ГЛАВА 5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ «ТЕХНИКА–ТЕХНОЛОГИЯ–ПРОДУКЦИЯ» ПРИ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОМ ГИГРОТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА КОЖЕВЕННО-ОБУВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ПРОЦЕССЕ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

5.1. Основные положения метода подобия функционирования технических систем «техника–технология–продукция» при интенсифицированном гигротермическом воздействии

5.1.1. Критерии подобия технического состояния как обобщённые параметры системы «техника–технология–продукция» при интенсифи- цированном гигротермическом воздействии

Как указано в работах [1, 7, 8, 36, 53, 54, 113, 123], согласно классической теории подобия, критерии подобия можно получать различными методами, например, интегральных аналогов; анализа размерностей параметров; применения системы относительных единиц.

В работе [103] показано, что метод анализа размерностей параметров, в отличие от методов интегральных аналогов и относительных единиц, в наибольшей степени отвечает задаче представления в простой математической модели процесса функционирования подсистем на различных этапах их синтеза и анализа. При этом состав параметров устанавливается или на основании уравнений, описывающих функционирование подсистемы, или посредством метода экспертных оценок, корреляционного анализа, опыта исследователя, а также с учётом задачи исследований.

Особенности этого метода в аспекте формирования критериев подобия функционирования элементарных подсистем, в частности системы ИГО, заключаются в следующем.

Допустим, рассматриваемая подсистема «технология» имеет: r выходных характеристик функционирования $y_i, i = \overline{1, r}$; n внутренних структурных параметров $z_j, j = \overline{1, n}$; m входных задающих параметров функционирования $x_j, j = \overline{1, m}$ и ℓ входных возмущающих (управляющих) параметров функционирования $s_j, j = \overline{1, \ell}$. Причём множество параметров $\{x_j, z_j, s_j\}$ представляет собой, в общем случае, совокупность пересекающихся или непересекающихся подмножеств этих параметров, каждое из которых соответствует определённой выходной y_i -й характеристике.

Для формирования критериев подобия методом анализа размерностей параметров исследуемого процесса достаточно иметь полные функциональные зависимости типа [54]:

$$f_i(y_i, x_j, z_j, s_j, t_j) = 0, \quad (5.1)$$

Эти зависимости отражают процесс функционирования подсистемы по y_i выходным характеристикам и существенные связи между параметрами подсистемы и параметрами воздействий. Выбор параметров для моделей функционирования вида:

$$y_i = f_i(x_j, z_j, s_j, t_j) \quad (5.2)$$

обеспечивает корректность получаемых критериев подобия функционирования и результатов решаемых с их помощью задач. При выборе этих параметров используется вся априорная информация, уравнения физических процессов, а при их отсутствии – методы экспертных оценок, факторного эксперимента и др. Критерии подобия, формируемые методом анализа размерностей, представляют собой [7] отношения исследуемого выходного параметра подсистемы к определённой комбинации независимых параметров этой подсистемы. Число независимых параметров в критериальном выражении не должно превышать числа основных единиц q измерения параметров этой модели, но должно быть равным рангу k полной матрицы их размерностей. Ранг полной матрицы – это наибольший порядок отличного от нуля определителя, со-

ставленного из элементов строк матрицы показателей размерностей элементов x_j, z_j, s_j, t_j .

Количество комбинаций k независимых параметров, определяемых методом анализа размерностей параметров для модели вида (5.2), в общем случае может быть большим единицы, а выбор той или иной комбинации зависит от поставленной задачи исследований. Исходя из этого, и в рамках задачи установления подобия функционирования подсистемы, при условиях однозначности, определённых составом и значениями параметров x_j, z_j, s_j , очевидным является тот факт, что при выборе состава (комбинации) независимых параметров необходимо стремиться к включению в этот состав параметров из всех множеств: $\{x_j\}$, $\{z_j\}$ и $\{s_j\}$. Это требование не противоречит третьей теореме подобия в её второй формулировке, изложенной в работе [54], и позволяет получить критериальные выражения, системно объединяющие параметры подсистемы – входные задающие и входные возмущающие (управляющие) параметры, а также внутренние структурные параметры с её выходными характеристиками функционирования.

Второе необходимое требование при формировании критериев подобия функционирования касается выбора состава характеристик функционирования Y_i , которое можно сформулировать следующим образом: в состав характеристик функционирования подсистемы обязательно должны быть включены характеристики, определяющие процесс функционирования во времени t – определяющие характеристики функционирования.

С учётом сформулированных требований и дополнительных условий процесс синтеза критериев подобия функционирования подсистем ИГО заключается в следующем:

- 1) Представление модели функционирования подсистем ИГО множеством функциональных зависимостей.

- 2) Определение количества и состава независимых параметров для критериальных зависимостей. Основные положения методики определения количества независимых параметров для критериев подобия функционирования аналогичны положениям классической теории подобия [122].

3) Формирование критериев подобия функционирования подсистемы и функциональной зависимости в критериальной форме.

Выражения для критериев подобия функционирования определяются по методике, аналогичной методике, изложенной в работе [123]. Основные же её положения, в аспекте поставленной задачи, заключаются в следующем.

За основу принимается функциональная зависимость для Y_i -й выходной характеристики. Критерии подобия функционирования представляют собой отношения определяющих Y_i -х выходных характеристик системы ИГО к произведению $k_i, i=1, \bar{n}$ независимых параметров $p_1, p_2, \dots, p_n$, зависимости, записанных с соответствующими показателями степеней $\alpha, \beta, \dots, \gamma$. Общее количество критериев подобия функционирования $k_{\Pi i} = N_{ki}$ (где N – общее количество параметров в функциональной зависимости. Критерий подобия для характеристики Y_i называется определяющим, а остальные – обеспечивающими подобие функционирования подсистемы по Y_i -й выходной характеристике. Выражение для определяющего критерия, например, будет иметь вид:

$$\pi_{y_i} = \frac{Y_i}{p_1^\alpha \cdot p_2^\beta \cdot \dots \cdot p_n^\gamma}. \quad (5.3)$$

После формирования критериев подобия для всех Y_i -х выходных характеристик подсистемы ИГО модель её функционирования представляют в критериальной форме:

$$\{\pi_{y_i}\} = \{f(\pi_{1y_i}, \pi_{2y_i}, \dots, \pi_{(M-k-1)y_i})\}. \quad (5.4)$$

В зависимости от задачи и этапа исследования подобия функционирования подсистемы ИГО критериальные модели следует подразделять на основные и дополнительные, детерминированные и стохастические.

Основной критериальной моделью подобия функционирования подсистемы ИГО будем называть математическую зависимость, отражающую в форме критериев подобия основное целевое назначение подсистемы ИГО в условиях её однозначности и установленных задач исследования качества функционирования.

Дополнительной критериальной моделью подобия функционирования подсистемы ИГО будем называть математическую зависимость, отражающую в форме критериев подобия функционирования дополнительное целевое

назначение подсистемы ИГО в условиях её однозначности и установленных задач исследования качества её функционирования.

5.1.2. Обобщённые индикаторы подобия как средства оценки и достижения требуемого технического состояния системы «техника–технология–продукция» при интенсифицированной гигротермической обработке

Первым необходимым условием подобия явлений, протекающих в геометрически подобных системах, является численное равенство отношений величин всех одноименных параметров в различных сходственных точках данного и исследуемого, из групп подобных, явления [123].

Вторым необходимым условием подобия является независимость друг от друга величин, характеризующих эти явления и наличие между ними определённой связи. Если эта связь описывается в виде математических зависимостей, то эти зависимости для подобных явлений должны быть буквенно одинаковы и однородны по отношению к подобному преобразованию входящих в них величин. Математические зависимости двух подобных явлений будут отличаться друг от друга лишь общим функциональным множителем $\varphi(C_1, \dots, C_n)$, т.е. для первого явления это уравнение будет иметь вид:

$$\varphi(x_1^1, \dots, x_n^1) = 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad (5.5)$$

а для подобного ему явления

$$\varphi(x_1^2, \dots, x_n^2) = \varphi(x_1^1 C_1, \dots, x_n^1 C_n) = \varphi(x_1^1, \dots, x_n^1) \cdot \varphi(C_1, \dots, C_n), \quad (5.6)$$

где m – число уравнений связи.

Функции типа (5.5) в теории подобия называются подобнообразными (гомогенными). Отношения функциональных множителей для различных k -пар подобных явлений, т.е.

$$\frac{\psi_i^{k-1}(C_1, \dots, \tilde{N}_n)}{\psi_i^k, \dots, \tilde{N}_n} = 1 \quad (5.7)$$

называются индикаторами подобия.

Таким образом, подобные явления должны описываться одинаковыми уравнениями условно, или, безусловно, инвариантными по отношению к подобным преобразованиям. В первом случае индикаторы подобия должны быть равны единице, а во втором случае их множители $\varphi_i(C_1, \dots, C_n)$ должны непосредственно сокращаться и выбор констант подобия здесь ничем не ограничивается.

В отличие от установленного третьей теоремой условия необходимости постоянства отношений моновалент для подобных явлений, метод подобия функционирования включает это условие лишь как частный случай подобного соответствия сравниваемых систем. Этот случай предполагает абсолютное (в допустимых пределах) равенство значений выходных характеристик и соответственных параметров сравниваемых систем или одной и той же системы в разные периоды её функционирования.

Необходимым же условием подобия функционирования систем, в виде системы «техника–технология–продукция» при интенсифицированном гигротермическом воздействии, является численное постоянство соотношений масштабов выходных моновалент (выходных характеристик) к комплексу, переменных в общем случае, масштабов всех или некоторых существенных моновалент, описывающих эту систему. Поэтому, например, для однородных систем при подобию их функционирования требование постоянства соотношений соответственных моновалент не является обязательным. Такого типа отношения представляют собой обобщённые индикаторы подобия функционирования системы по i -й выходной характеристике. Обобщённые индикаторы подобия формируются из частных индикаторов подобия с учётом второй теоремы подобия и ряда особенностей метода подобия функционирования.

Индикаторы подобия функционирования системы «техника–технология–продукция» при интенсифицированном гигротермическом воздействии являются важнейшими численными комплексами, позволяющими выполнять оценку, достижение и управление качеством функционирования ИГО, опе-

рируя лишь безразмерными масштабными коэффициентами и их соотношениями.

5.2. Основные принципы методологии подобия функционирования технических систем «техника–технология–продукция»

В материальном производстве целевые системы типа «предмет труда – средство труда – продукт труда» представляют собой сложные системы, обладающие, по крайней мере, одним из перечисленных признаков [123]: система допускает разбиение на подсистемы, изучение каждой из которых с учётом влияния других подсистем в рамках поставленной задачи имеет содержательный характер; система функционирует в условиях существенной неопределённости, и воздействие среды на неё обуславливают случайный характер изменения её параметров и структуры; система осуществляет целенаправленный выбор своего поведения.

В рассматриваемой системе интенсифицированного гигротермического воздействия продукт труда («продукция») на различных этапах жизненного цикла – от проектирования до утилизации – характеризуется множествами параметров, показателей, состав и абсолютные значения которых, как правило, изменяются вследствие объективных или субъективных причин. Продукция, являющаяся подсистемой рассматриваемой сложной системы, в свою очередь, может содержать в своём составе подсистемы низшего иерархического уровня, элементарные подсистемы [123].

Подсистема Π (продукция) и входящие в неё подсистемы низшего уровня Π_i характеризуются: выходными параметрами и показателями качества функционирования $\{y_{ji}^n\}$ (j – индекс параметра показателя, $j=1,\bar{r}$; i – индекс элементарной i -й подсистемы, n – индекс параметра соответствующей подсистемы); входными параметрами, показателями функционирования $\{x_{ji}^n\}$, $j=1,\bar{n}$; структурными (конструктивными, физическими) внутренними пара-

метрами $\{z_{ji}^n\}$, $j=1, \bar{m}$; входными параметрами возмущающих воздействий $\{s_{ji}^n\}$, $j=1, \bar{l}$; (рис. 5.1).

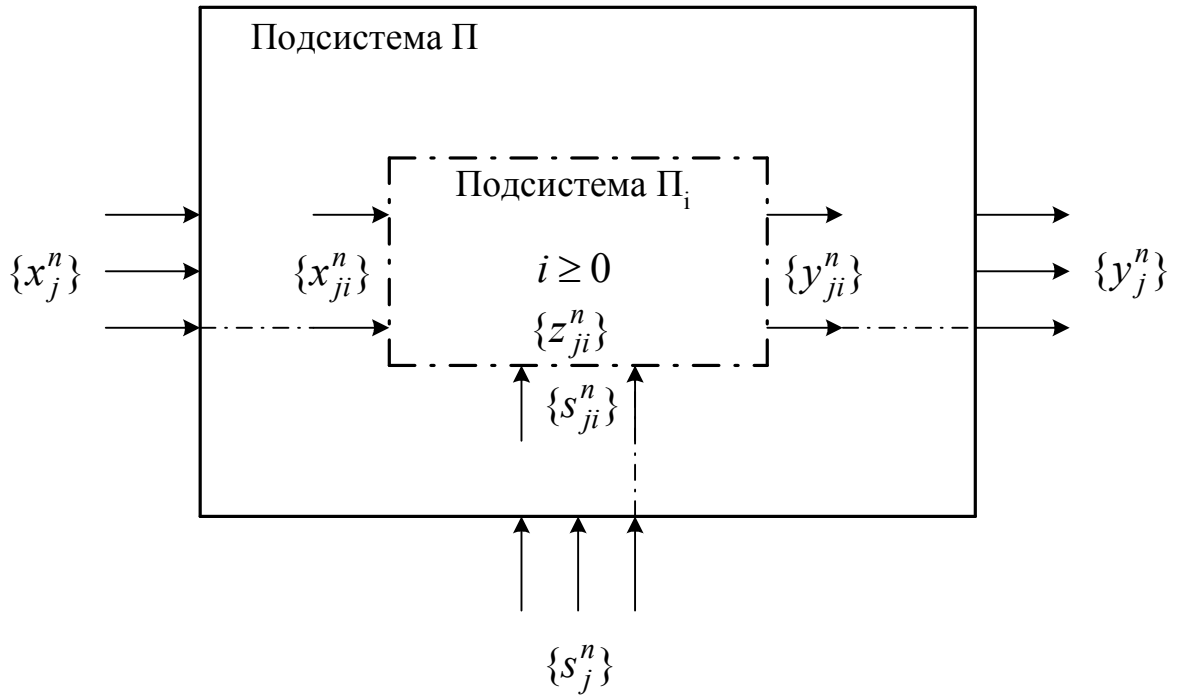


Рис. 5.1. Структурная модель подсистемы Π – продукция

В общем виде модель функционирования подсистемы Π имеет вид:

$$|\Pi| = \begin{vmatrix} x_{i1}^n \dots x_{j1}^n \dots z_{i1}^n \dots z_{j1}^n \dots s_{i1}^n \dots s_{j1}^n & \rightarrow y_1^n \\ \dots & \dots \\ x_{ik}^n \dots x_{jk}^n \dots z_{ik}^n \dots z_{jk}^n \dots s_{ik}^n \dots s_{jk}^n & \rightarrow y_k^n \\ \dots & \dots \\ x_{ir}^n \dots x_{jr}^n \dots z_{ir}^n \dots z_{jr}^n \dots s_{ir}^n \dots s_{jr}^n & \rightarrow y_r^n \end{vmatrix} \quad (5.8)$$

где $\rightarrow$ – знак соответствия; индексы при аргументах указывают на их j -порядковый номер и принадлежность их к y_i -й выходной характеристике функционирования подсистемы.

При наличии в подсистеме Π_{i-x} подсистем низшего уровня с взаимно наложенными связями на аргументы и функции y_j модель (5.8) усложняется [123].

Средства труда в рассматриваемой системе представляют собой совокупность технологий (технологический процесс или их множество) и средств

ва технологии (технологическое оборудование или их множество) – т.е. совокупность подсистем С (средств) и подсистем Т (технологий).

Предмет труда представляет собой объект технологии – подсистему О. По аналогии с подсистемой П подсистемы С, Т и О характеризуются множеством выходных (y), входных (x) и внутренних, структурных (z) параметров, показателей. Модели функционирования каждой из этих подсистем в отдельности описываются по аналогии с подсистемой П.

По аналогии с подсистемой П подсистемы С, Т и О могут иметь в своём составе множества подсистем низшего иерархического уровня (различное технологическое оборудование, различные техпроцессы и т.п.).

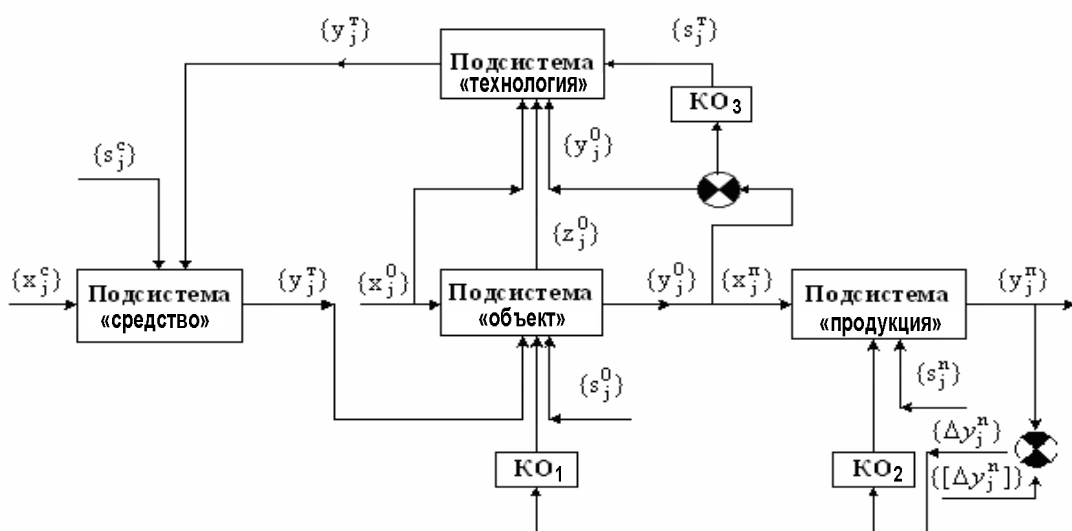


Рис. 5.2. Структурная модель функционирования системы СТОП

Система (рис. 5.2), «средство – технология – объект технологии – продукция» имеет следующие особенности: параметры и показатели каждой из подсистем объединены между собой функциональными связями; отдельные множества параметров, показателей являются общими для групп подсистем, что позволяет реализовать в системе СТОП прямые и обратные связи между её подсистемами (рис. 5.2).

Подсистема О – объект технологии. В качестве структурных параметров множества могут быть, например: для вещества – параметры химического состава и размерные параметры вещества; для детали – параметры хими-

ческого состава и размерные параметры материала детали. В качестве входных параметров $\{x_j^0\}$ могут быть: для вещества – его истинные физические параметры (теплофизические, физико-механические); для детали – исходные физические параметры [123].

В качестве входных параметров возмущающих воздействий $\{s_j^0\}$ могут быть приняты: для вещества – параметры режима технологии (температура, давление и др.); для детали – параметры режима технологии (усилие, подача, скорость резания и др.). В качестве выходных параметров функционирования объекта технологии $\{y_j^0\}$ могут быть приняты, соответствующие заданным техническими условиями на продукцию, физические параметры $\{x_j^n\}$ и размеры элементарных частиц, поверхностей и др.

Подсистема П – продукция. Множества параметров этой подсистемы могут включать: множество $\{z_j^n\}$ для вещества и детали – параметры химического состава и размерные параметры; множество $\{x_j^n\}$ для вещества и детали – исходные, заданные техническими условиями, физические параметры материала вещества, детали; множество $\{s_j^n\}$ – для вещества параметры внешней среды типа влаги, давления и др., а для детали – параметры внешних воздействий типа усилия, момента, влаги и др.; множество $\{y_j^n\}$ – для вещества параметры функционального назначения – выходные характеристики функционирования) типа параметров физико-химической активности в определённых условиях, а для детали – параметры физико-механической активности типа нормальных и касательных напряжений, жёсткости (гибкости) и др.

Подсистема С – средство технологии. Множество параметров этой подсистемы могут включать: множество $\{z_{ji}^n\}$ размерные и физико-химические параметры элементов технологических параметров элементов технологических аппаратов и технологического оборудования, типа диаметров и зазоров в цилиндропоршневой группе прессов, диаметры шестерён коробок скоростей (передач) и др.; множество $\{x_j^n\}$ – входные теплофизические и фи-

зико-механические параметры технологической энергии (температура, момент, скорость, давление и др.); множество $\{y_j^n\}$ – выходные (преобразованные входные) теплофизические и физико-механические параметры технологической энергии; множество $\{s_j^n\}$ – нормативные по составу и значениям параметры технологических процессов получения продукции из объекта технологии (скорость, давление, подача, температура и др.).

Подсистема Т – технология. Множества параметров этой подсистемы могут включать: множество $\{z_{ji}^n\}$ – параметры формализованных алгоритмов физико-химических и(или) физико-механических технологических процессов по элементарным операциям, переходам, стадиям; множество $\{s_j^n\}$ – отклонения выходных параметров объекта технологии $\{y_j^n\}$ от их состава и нормативных значениях $\{[y_j^n]\}$; множество $\{x_j^n\}$ – входные параметры, объединяющие параметры множеств $\{x_j^0\}$, $\{z_{ji}^n\}$ и $\{[y_j^0]\} = \{[y_j^n]\}$ объекта технологии; множество $\{y_j^T\}$ – нормативные по составу и значениям параметры технологических процессов получения продукции из объекта технологии.

Анализ составов множеств параметров, показателей подсистем позволяет установить связи и соотношения между множествами системы СТОП в процессе её функционирования. Так, прямые связи (ри. 5.2) очевидны между множествами, объединёнными такими соотношениями:

$$\{y_j^0\} \supseteq \{y_j^n\}; \{y_j^r\} \subseteq \{s_{jc}\}; \{y_j^c\} \supseteq \{s_j^0\}.$$

$$\{x_j^0\} \cup \{z_j^0\} \cup \{[y_j^0]\} \supseteq \{[x_j^r]\}.$$

Представленные соотношения между множествами нестрогие. Возможные неравенства (включения) между ними могут иметь место при избыточности составов параметров одних множеств по отношению к составам параметров других множеств или при наличии в составах отдельных множеств, например $\{x_j^N\}$, появления параметров случайных воздействий, помех.

Функционирование системы СТОП с заданными составом и значениями выходных характеристик $\{[y_j^n]\}$ возможно при наличии обратных связей. Главная обратная (отрицательная) связь формируется путём сравнения действительных состава и значений множества выходных характеристик функционирования продукции $\{y_j^n\}$ с заданными множествами $\{[y_j^n]\}$. Результат сравнения $\{\Delta y_j^n\}$, преобразованный корректирующим органом (KO_1 и KO_2), поступает в качестве возмущающих воздействий в состав множеств $\{s_j^0\}$ и $\{s_j^n\}$. Дополнительная обратная связь формируется путём сравнения действительных состава и значений множества выходных параметров объекта технологии $\{y_j^0\}$ с заданными составом и значениями параметров этого множества $\{[y_j^0]\}$. Полученный результат сравнения $\{\Delta y_j^0\}$, преобразованный корректирующим органом (KO_3) в соответствующий сигнал, поступает в качестве возмущающего воздействия в состав множеств $\{s_j^0\}$.

Рассмотренный в работе [123] функционально-структурный анализ сложной системы СТОП позволяет сделать вывод о том, что процесс формирования управления функционированием этой системы предполагает необходимым и достаточным использование общих системных методов. К таким методам относятся системный и операционный подходы, активно разрабатываемые в теоретическом плане и широко используемые в ряде отраслей техники и технологии.

Системный подход позволяет рассматривать систему с учётом всех необходимых внутренних взаимосвязей, составляющих её компонентов и внешних взаимосвязей системы со средой или с другими системами, объектами, участвующими в рассматриваемом процессе, явлении. При этом возможны два случая применения системного подхода – как на стадии существования реальной системы (эксплуатации, экспериментальных исследований и др.), так и на стадии создания системы или её модели (проектировании, изготовлении).

Операционный подход позволяет формулировать общие принципы построения модели функционирования системы в условиях достижения поставленной перед ней цели. Под операцией понимается совокупность взаимосвязанных действий, выполняемых всеми компонентами, участвующими в рассматриваемом процессе функционирования для достижения поставленной перед системой цели.

Как системный, так и операционный подходы по целевому назначению, как отмечено в работе [123], ориентированы на достижение поставленных перед сложной системой целевых функций, определяемых функциональными показателями отдельных подсистем. Функциональные же показатели (показатели функционирования) являются обобщёнными показателями отдельных подсистем, а некоторые из них (рис. 5.2) одновременно являются аргументами, входящими параметрами, функциональными показателями других подсистем.

Действительно (рис. 5.2), для получения продукции с заданными исходными характеристиками функционирования $\{y_j^n\}$, воспринимающие внешние воздействия $\{s_j^n\}$, необходимо воздействовать на предмет (сырьё и др.) в определённой технологической последовательности параметрами технологических воздействий $\{s_j^0\}$, являющихся одновременно выходными характеристиками функционирования $\{y_j^c\}$ средства технологии.

Исследование и реализация сложных систем СТОП на различных этапах жизненного цикла путём использования функциональных моделей, определяющих условия подобию их функционирования, относительно заданного качества функционирования системы-налога, также представляются возможными.

5.3. Общие положения моделирования подобию функционирования процессов интенсифицированной гигротермической обработки

В производстве обуви целевыми системами типа «предмет труда – средство труда – продукт труда» являются процессы гигротермического воздействия на заготовки верха обуви, которые для применения метода ПФТС

[7, 123], разбиваются на отдельные подсистемы (рис.5.3), изучение каждой из которых с учётом влияния других подсистем имеет содержательный характер.

Представленная система должна функционировать в условиях существенной неопределённости, и воздействие среды на неё будет обуславливать случайный характер изменения её параметров и структуры.

Система должна осуществлять целенаправленный выбор своего поведения [22].

Средство труда в рассматриваемой сложной системе представляет собой совокупность технологии (Т) и средств технологий (С). В данном процессе гигротермического воздействия рассматриваются несколько технологических процессов – увлажнение, влажно-тепловая фиксация, сушка и влажно-тепловая обработка, в качестве средств технологии – технологическое оборудование – установка, состоящая из парогенератора и вакуумного насоса.

Предмет труда представляет собой объект технологии – подсистему О. Данная подсистема является первоначальным объектом, на который осуществляется гигротермическое воздействие.

По аналогии с подсистемой П подсистемы С, Т и О характеризуются множествами выходных (y), входных (x), возмущающих (s) и внутренних структурных (z) параметров показателей. Модели функционирования каждой из этих подсистем в отдельности описываются по аналогии с подсистемой П.

Очевидно, что по аналогии с подсистемой П подсистемы С, Т и О могут иметь в своём составе множества подсистем низшего иерархического уровня (различное технологическое оборудование, различные техпроцессы и т.п.). Предлагаемая в данной работе система гигротермического воздействия представлена в виде структурной модели функционирования (рис. 5.3).

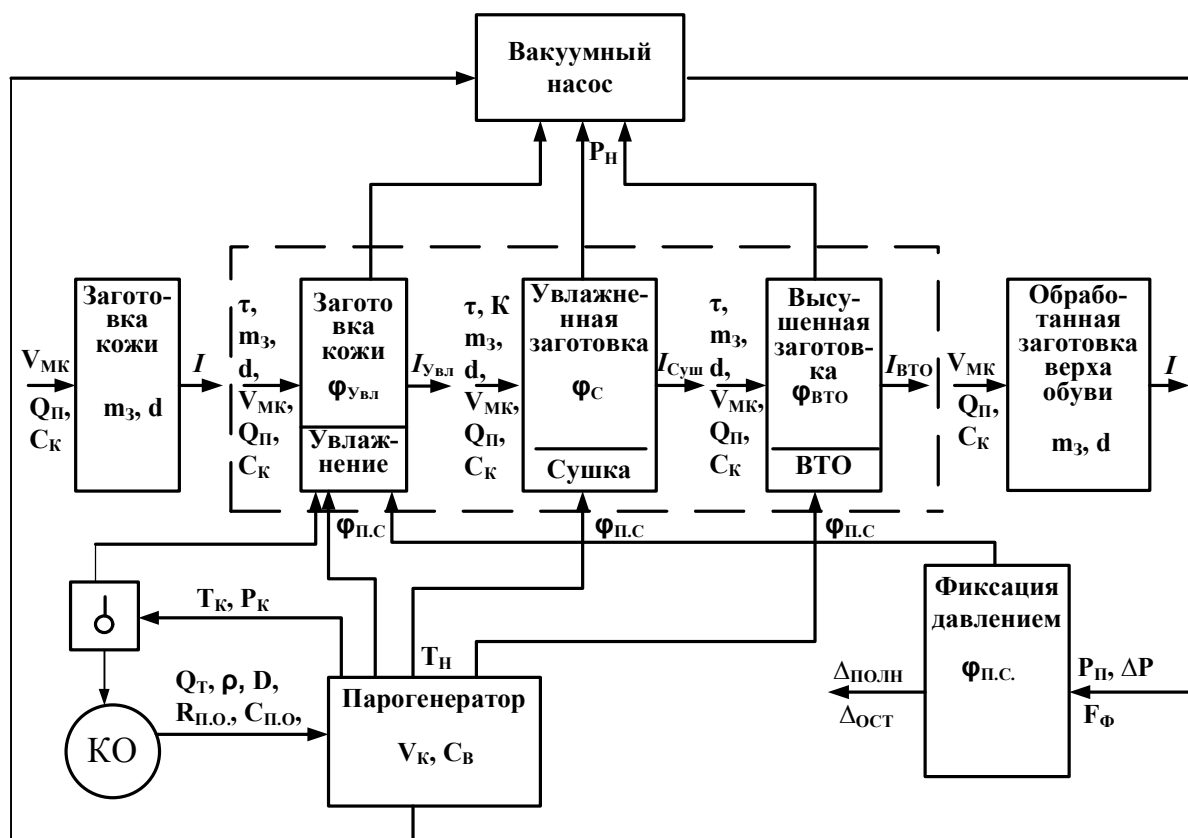


Рис. 5.3. Структурная модель функционирования системы ИГВ

Эта целевая система представляет собой сложную систему гигротермического воздействия: «средство – технология – объект технологии – продукция» (система СТОП); которая обладает ниже перечисленными особенностями.

Во-первых, параметры и показатели каждой из подсистем объединены между собой функциональными связями.

Во-вторых, отдельные множества параметров, показателей являются общими для групп подсистем, что позволяет реализовать в системе СТОП прямые и обратные связи между её подсистемами (рис. 5.3).

Подсистема С – «средство технологии», в которую входят вакуумный насос и парогенератор.

В множество параметров этой системы $\{z_{ji}^C\}$ входят: объём камеры – V_K , теплоёмкость воды C_B . Множество $\{x_j^C\}$ включает параметры рабочей среды: плотность пара ρ , коэффициент диффузии D , удельная теплоёмкость парооб-

разования $R_{п.о.}$, удельная теплота парообразования $C_{п.}$, количество теплоты $Q_{т.}$. Выходным параметром $\{\phi_j^e\}$ является: влажность паровоздушной среды фп.с.. Входными параметрами $\{s_j^{\bar{n}}\}$ возмущающих воздействий являются начальные и конечные значения давления $P_{н.}$, $P_{к.}$ и температуры $T_{н.}$, $T_{к.}$.

Подсистема Т – «технология», предусматривающая последовательность выполнения операций гигротермического воздействия.

Структурными параметрами $\{z_j^t\}$ для каждой из подсистем «технология» являются значения относительной влажности материала ф. Входными параметрами возмущающих воздействий $\{s_j^t\}$ являются: температура начальная и конечная $T_{н.}$, $T_{к.}$, начальное и конечное давление $P_{н.}$, $P_{к.}$, приформовочное давление $P_{п.}$, перепад давлений ΔP , усилие формования $F_{ф.}$. Входными параметрами $\{x_j^t\}$ этих подсистем являются: время τ , коэффициент цикличности K ; масса заготовки $m_з$, толщина заготовки верха обуви d , объём микрокапилляров $V_{МК}$, паропроницаемость кожи $Q_{п.}$, удельная теплоёмкость кожи $C_{к.}$. Выходными параметрами $\{\phi_j^t\}$ функционирования данных подсистем являются интенсивность интенсивность каждого из процессов гигротермического воздействия I и величина полной деформации $\Delta_{полн}$ для последней подсистемы - «фиксация».

Подсистемой О – «объекта технологии» является заготовка кожи, помещаемая в вакуумную камеру.

В качестве структурных параметров $\{z_j^o\}$ этой подсистемы являются: масса заготовки $m_з$, толщина заготовки верха обуви. Входными параметрами $\{x_j^o\}$ этой подсистемы являются: объём микрокапилляров $V_{МК}$, паропроницаемость кожи $Q_{п.}$, удельная теплоёмкость кожи $C_{к.}$. В качестве входных параметров возмущающих воздействий $\{s_j^o\}$ для данной подсистемы принимаются начальные и конечные значения давления $P_{н.}$, $P_{к.}$ и температуры $T_{н.}$, $T_{к.}$. Выходным параметром функционирования объекта технологии $\{\phi_j^o\}$ принимается достигаемая относительная влажность заготовки после каждого из процессов гигротермического воздействия .

Подсистемой П – «продукция» – является заготовка верха обуви после соответствующего гигротермического воздействия.

Структурными параметрами этой системы $\{z_j^n\}$ являются: масса заготовки m_3 , толщина заготовки верха обуви d ; множеством входных параметров функционирования продукции $\{x_j^n\}$ принимаются: объём микрокапилляров $V_{МК}$, паропроницаемость кожи $Q_{П}$, удельная теплоёмкость кожи C_K ; множеством $\{s_j^n\}$ входных параметров возмущающих воздействий для данной подсистемы являются начальные и конечные значения давления P_H, P_K и температуры T_H, T_K ; выходным параметром $\{y_j^n\}$ функционирования продукции является величина остаточной деформации заготовки $\Delta_{ост}$.

Для реализации интенсифицированного гигротермического воздействия как системы с заданным составом и значениями выходных характеристик $\{\{\phi'_j\}\}$ необходимо наличие обратных связей. Так, в процессе гигротермического воздействия отрицательная связь может быть реализована посредством автоматического сравнения температуры паровоздушной среды в вакуумной камере со значением температуры в состоянии насыщенной. Так как процесс должен осуществляться при чётком согласовании температуры и давления в вакуумной камере [133] $\phi = f(P, T)$, то при их рассогласовании сигнал, полученный от температурного датчика в вакуумной камере (повышении или понижении температуры), посылается на корректирующий орган КО, который компенсирует различие температуры в рабочей зоне, добавляя часть воды для снижения температуры или её повышения за счёт включения водонагревателя.

5.4. Модели подобия функционирования процессов гигротермической обработки (увлажнения, фиксации, сушки и влажно-тепловой обработки) в условиях вакуума

Для применения метода ПФТС система гигротермического воздействия разбивается на подсистемы: «объект технологии» – заготовка верха обуви,

обрабатываемая с использованием подсистемы - «средства технологии»: вакуумного насоса для создания разрежения в камере и парогенератора для получения паровоздушной среды. Реализуя, следующую подсистему «технологии», получаем подсистему «продукцию» – обработанную заготовку верха обуви. Для каждого вида технологической операции выходными характеристиками являются интенсивность I (увлажнения, сушки и влажно-тепловой обработки) и полная деформация $\Delta_{\text{полн}}$ для фиксации. Под интенсивностью понимается скорость достижения требуемой по типовой технологии влажности заготовок верха обуви:

$$I_i = \frac{d\varphi}{d\tau}, \quad (5.9)$$

где φ – относительная влажность заготовок верха обуви, после соответствующего воздействия;

τ – время гигротермического воздействия.

В работах В.М. Чесунова [167], Л.И. Адигезалова [4], Л.В. Лариной [64, 69] и др. критерии оптимизации процессов увлажнения, сушки и влажно-тепловой обработки – относительная влажность заготовок верха обуви φ_u , φ_c , $\varphi_{\text{вто}}$, условный модуль упругости E_u , остаточная деформация $\xi_{\text{ост}}$, в зависимости от факторов процессов получены на основе решения многофакторных оптимизационных задач с помощью методов теории планирования эксперимента. Причём при априорном ранжировании, учитывающем мнения специалистов, выбирались от 2–4 факторов, которые и рассматривались далее при получении соответствующих уравнений регрессий как основные варьируемые факторы. Количественные значения остальных факторов (конструктивных, технологических) выбирались постоянными с учётом предварительных исследований.

Численные значения факторов, обеспечивающих рекомендуемые значения перечисленных параметров, достигаемые за оптимальное время t_i , приведены в таблицах 5.1–5.4.

Подсистема «средство» включает следующие параметры: объём камеры V_k , коэффициент диффузии D , плотность пара ρ , удельная теплоёмкость

воды C_B , удельная теплоёмкость пара; $C_{ПО}$, удельная теплота парообразования $R_{ПО}$, количество теплоты Q_T , влажность паровоздушной среды $\varphi_{п.с}$.

Подсистема «технология» характеризуется следующими параметрами: температура начальная и конечная T_H , T_K , начальное и конечное давление P_H , P_K , коэффициент цикличности K , время обработки τ , приформовочное давление P_P , перепад давлений ΔP , усилие формования F_F .

Подсистема «объект технологии» в соответствии с классификацией Р.В. Луцыка, приведённой в работе [94], включает:

1) технологические свойства заготовки, определяющие задачи и способ гигротермического воздействия (размеры, плотность, степень сложности микроструктуры);

2) структурно-геометрические, определяющие внутренний массоперенос (пористость, интегральные и дифференциальные кривые распределения микро- и макропор по размерам;

3) теплофизические свойства материала, характеризующие внутренний теплоперенос;

4) влагообменные свойства;

5) физико-механические, определяющие деформационно-релаксационные, прочностные изменения в материале при гигротермических воздействиях.

В качестве параметров, определяющих технологические свойства, в таблицы 5.1–5.4 включены масса заготовки m_3 [42, 100], толщина кожи хромового дубления d (ТУ 17-06-49-79) [42, 154].

Структурно-геометрические свойства представлены объёмом микрокапилляров $V_{м.к.}$.

Теплофизические свойства представлены паропроницаемостью Q_P [20, 45], удельной теплоёмкостью кожи C_K [42, 152], коэффициентом диффузионного сопротивления μ [100].

Влагообменные свойства учитывают адсорбционную форму связи влаги в микрокапиллярах.

Физико-механические свойства характеризуются остаточным удлинением $\xi_{\text{ост}}$, остаточной деформацией $\Delta_{\text{ост}}$, условным модулем упругости E_y

Математические модели процессов гигротермического воздействия (увлажнения, влажно-тепловой фиксации, сушки и влажно-тепловой обработки) с применением метода ПФТС [73, 141, 142] рассмотрены далее.

5.4.1. Математическая модель подобия функционирования подсистемы «технология – увлажнение»

Функциональная зависимость выходного параметра I интенсивности увлажнения от ряда определяющих её состояние параметров (табл. 5.1) составляемая в соответствии с методом ПФТС [7, 32, 33, 123] приведена ниже:

$$I = f(d, m_3, V_{\text{м.к.}}, Q_{\text{п}}, C_{\text{к}}, \mu, \varphi_{\text{пс}}, T_{\text{н}}, T_{\text{к}}, P_{\text{н}}, P_{\text{к}}, \tau, Q_{\text{т}}, K, P_{\text{п}}, \Delta P; F_{\text{ф}}, V_{\text{к}}, D, \rho, C_{\text{в}}, C_{\text{по}}, R_{\text{по}}) \quad (5.10)$$

Частные критерии подобия π_i получены используя специально разработанную программу KriNN [123]. Для получения частных критериев подобия необходимо выбрать комплекс независимых параметров, который формируется из условия независимости размерностей (в единой системе измерений). Причём количество независимых параметров должно быть равно числу основных единиц измерения СИ [26, 166].

В качестве независимых параметров применяются (табл. 5.1) начальная температура $T_{\text{н}}$, начальное давление в камере $P_{\text{н}}$, удельная теплоёмкость кожи $C_{\text{к}}$, объём камеры $V_{\text{к}}$, паропроницаемость $Q_{\text{п}}$.

Значения частных π -критериев для процесса увлажнения:

$$\begin{aligned} \pi(I) &= I / (T_{\text{н}}^{-0,5} \cdot P_{\text{н}}^1 \cdot C_{\text{к}}^{-0,5} \cdot V_{\text{к}}^{-0,33}) = 0,95 \cdot 10^{-24} \\ \pi(d) &= d / (T_{\text{н}}^0 \cdot P_{\text{н}}^0 \cdot C_{\text{к}}^0 \cdot V_{\text{к}}^{0,33}) = 5,24 \cdot 10^{-3} \\ \pi(m_3) &= m_3 / (T_{\text{н}}^{-1} \cdot P_{\text{н}}^1 \cdot C_{\text{к}}^{-1} \cdot V_{\text{к}}^1) = 1,87 \\ \pi(V_{\text{м.к.}}) &= V_{\text{м.к.}} / (T_{\text{н}}^0 \cdot P_{\text{н}}^0 \cdot C_{\text{к}}^0 \cdot V_{\text{к}}^0) = 0,25 \\ \pi(Q_{\text{п}}) &= Q_{\text{п}} / (T_{\text{н}}^{-0,5} \cdot P_{\text{н}}^1 \cdot C_{\text{к}}^{0,5} \cdot V_{\text{к}}^0) = 3884,37 \\ \pi(\mu) &= \mu / (T_{\text{н}}^0 \cdot P_{\text{н}}^0 \cdot C_{\text{к}}^0 \cdot V_{\text{к}}^0) = 3,2 \\ \pi(\varphi_{\text{пс}}) &= \varphi_{\text{пс}} / (T_{\text{н}}^0 \cdot P_{\text{н}}^0 \cdot C_{\text{к}}^0 \cdot V_{\text{к}}^0) = 0,97 \\ \pi(T_{\text{к}}) &= T_{\text{к}} / (T_{\text{н}}^1 \cdot P_{\text{н}}^0 \cdot C_{\text{к}}^0 \cdot V_{\text{к}}^0) = 1,02 \\ \pi(P_{\text{к}}) &= P_{\text{к}} / (T_{\text{н}}^0 \cdot P_{\text{н}}^1 \cdot C_{\text{к}}^0 \cdot V_{\text{к}}^0) = 2 \\ \pi(\tau) &= \tau / (T_{\text{н}}^{-0,5} \cdot P_{\text{н}}^0 \cdot C_{\text{к}}^{0,5} \cdot V_{\text{к}}^{0,33}) = 579298,66 \end{aligned}$$

$$\pi(D) = D / (T_H^{-1} \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^{-0,33}) = 4,99 \cdot 10^{-11}$$

$$\pi(\rho) = \rho / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-1} \cdot V_K^0) = 6,76$$

$$\pi(C_B) = C_B / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0) = 1,18$$

$$\pi(R_{\text{по}}) = R_{\text{по}} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0) = 298,13$$

$$\pi(C_{\text{по}}) = C_{\text{по}} / (T_H^{-1} \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0) = 4,58$$

$$\pi(Q_T) = Q_T / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot C_K^0 \cdot V_K^1) = 1,13$$

Таблица 5.1 – Наименование и размерность параметров для определения интенсивности процесса увлажнения

№	Параметр	Обозначение	Размерность в единицах СИ	Показатели степени размерностей в единицах СИ				Рекомендуемые условия однозначности	Независимые параметры по размерностям
				M	T	L	Q		
1	Объём камеры	V_K	м^3	0	0	3	0	$9 \cdot 10^{-2}$	да
2	Коэффициент диффузии пара	D	$\text{м}^2/\text{с}$	0	-1	2	0	$0,58 \cdot 10^{-4}$	
3	Плотность пара в условиях вакуума	ρ	$\text{кг}/\text{м}^3$	1	0	-3	0	$26 \cdot 10^{-2}$	
4	Удельная теплоёмкость воды	C_B	$\text{м}^2/(\text{с}^2 \text{ К})$	0	-2	2	-1	$1,915 \cdot 10^3$	
5	Удельная теплоёмкость парообразования	$C_{\text{по}}$	$\text{м}^2/(\text{с}^2 \text{ К})$	0	-2	2	-1	$2,018 \cdot 10^3$	
6	Удельная теплота парообразования	$R_{\text{по}}$	$\text{м}^2/\text{с}^2$	0	-2	2	0	$480 \cdot 10^3$	
7	Влажность паровоздушной среды	$\varphi_{\text{п.с}}$	$\text{кг}/\text{кг}$	0	0	0	0	0,97	
8	Количество теплоты	Q_T	$\text{кг м}^2/\text{с}^2$	1	-2	2	0	2050	
9	Время увлажнения	τ	с	0	1	0	0	360	
10	Температура начальная	T_H	К	0	0	0	1	323	да
11	Температура конечная	T_K	К	0	0	0	1	332	
12	Начальное давление в камере	P_H	$\text{кг}/(\text{с}^2 \text{ м})$	1	-2	-1	0	$20 \cdot 10^3$	да
13	Конечное давление в камере	P_K	$\text{кг}/(\text{с}^2 \text{ м})$	1	-2	-1	0	$50 \cdot 10^3$	
14	Масса заготовок	m_3	кг	1	0	0	0	$2,0 \cdot 10^{-3}$	
15	Толщина кожи хромового дубления	d	м	0	0	1	0	$1,6 \cdot 10^{-3}$	
16	Объём микрокапилляров	$V_{\text{м.к.}}$	м^3	0	0	3	0	$0,257 \cdot 10^{-3}$	
17	Паропроницаемость	$Q_{\text{п}}$	$\text{кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$	1	-1	-2	0	$107,73 \cdot 10^3$	
18	Удельная теплоёмкость кожи	C_K	$\text{м}^2/(\text{с}^2 \text{ К})$	0	-2	2	-1	$1,61 \cdot 10^3$	да
19	Коэффициент диффузионного сопротивления	μ	-	0	0	0	0	3,2	

Обобщённый критерий подобия процесса увлажнения (5.11) получен перемножением частных критериев подобия и подстановкой их в числитель при прямой зависимости выходного параметра от рассматриваемого и в знаменатель – при обратной.

Обобщённые критерии подобия процесса увлажнения приводятся ниже.

$$\prod_{i=1}^k \pi_{i_{Y_{\text{вл}}}} = \frac{\pi_{I_{Y_{\text{вл}}}} \cdot \pi_d \cdot \pi_{m_3} \cdot \pi_{V_{\text{М.К.}}} \cdot \pi_{Q_{\text{П}}} \cdot \pi_p \cdot \pi_{C_{\text{ПО}}} \cdot \pi_{Q_T} \cdot \pi_D \cdot \pi_{\varphi_{\text{П.С}}} \cdot \pi_{t_K}}{\pi_{P_K} \cdot \pi_{C_B} \cdot \pi_{R_{\text{ПО}}} \cdot \pi_{\mu} \cdot \pi_{\tau}}, i = \overline{1, k}, \text{ при } k = 16 \quad (5.11)$$

$$\prod_{i=1}^k \pi_{i_{Y_{\text{вл}}}} = 0,69.$$

Формирование обобщённого критериального выражения для интенсивности I выполняется путём использования обобщённого критерия подобия функционирования системы, а затем решения полученного равенства относительно I .

Полученная обобщённая критериальная зависимость интенсивности процесса увлажнения: (5.12) имеет вид:

$$I_{Y_{\text{вл}}} = \frac{d \cdot m \cdot V_{\text{М.К.}} \cdot t_K \cdot C_K^{3,5} \cdot \rho \cdot C_{\text{ПО}} \cdot Q_T \cdot D \cdot \varphi_{\text{П.С}} \cdot Q_{\text{П}}}{t_H^{0,5} \cdot P_K \cdot C_B \cdot R_{\text{ПО}} \cdot V_K^{1,33} \cdot P_H^4 \cdot \mu \cdot \tau} \cdot 0,69 \quad (5.12)$$

На основе обобщённой критериальной зависимости интенсивности увлажнения [142], был получен следующий график (рис. 5.4).

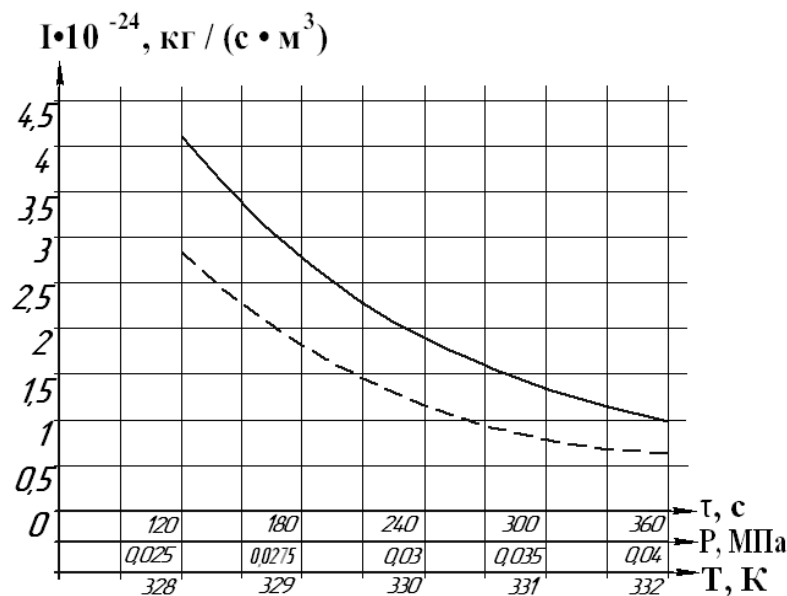


Рис. 5.4. Зависимости интенсивности увлажнения от способа подачи пара, времени, температуры и давления:
 — при подаче пара с бахтармянной стороны;
 - - - - - при подаче пара с лицевой стороны

5.4.2. Математическая модель подобия функционирования подсистемы «технология-фиксация»

На основании методики приведённой ранее в общем виде получена математическая модель процесса фиксации.

Функциональная зависимость выходного параметра полной деформации $\Delta_{\text{ПОЛН}}$ (фиксации) от ряда определяющих её состояние параметров (табл. 5.2) полученная в соответствии с методом ПФТС [7, 32, 33, 123] приведена ниже:

$$\Delta_{\text{ПОЛН}} = f(d, P_{\text{П}}, Q_{\text{П}}, C_{\text{К}}, \mu, \varphi_{\text{ПС}}, T_{\text{Н}}, T_{\text{К}}, \Delta P, F_{\text{Ф}}, \tau, V_{\text{К}}). \quad (5.13)$$

Частные критерии подобия π_i получены используя специально разработанную программу KriNN [123]. Для получения частных критериев подобия необходимо выбрать комплекс независимых параметров, который формируется из условия независимости размерностей (в единой системе измерений). Причём количество независимых параметров должно быть равно числу основных единиц измерения СИ [26, 166].

В качестве независимых параметров применяются (табл. 5.2) начальная температура $T_{\text{Н}}$, начальное давление в камере $P_{\text{Н}}$, удельная теплоёмкость кожи $C_{\text{К}}$, объём камеры $V_{\text{К}}$, паропроницаемость $Q_{\text{П}}$.

Значения частных π -критериев процесса формования

$$\pi(\Delta_{\text{ПОЛН}}) = \Delta_{\text{ПОЛН}} / (T_{\text{Н}}^0 \cdot Q_{\text{П}}^0 \cdot C_{\text{К}}^0 \cdot V_{\text{К}}^0) = 23$$

$$\pi(d) = d / (T_{\text{Н}}^0 \cdot Q_{\text{П}}^0 \cdot C_{\text{К}}^0 \cdot V_{\text{К}}^{0,33}) = 5,24 \cdot 10^{-3}$$

$$\pi(P_{\text{П}}) = P_{\text{П}} / (T_{\text{Н}}^{-0,5} \cdot Q_{\text{П}}^1 \cdot C_{\text{К}}^{0,5} \cdot V_{\text{К}}^{-0,33}) = 0,37$$

$$\pi(\mu) = \mu / (T_{\text{Н}}^0 \cdot Q_{\text{П}}^0 \cdot C_{\text{К}}^0 \cdot V_{\text{К}}^0) = 3,2$$

$$\pi(\varphi_{\text{ПС}}) = \varphi_{\text{ПС}} / (T_{\text{Н}}^0 \cdot Q_{\text{П}}^0 \cdot C_{\text{К}}^0 \cdot V_{\text{К}}^0) = 0,97$$

$$\pi(T_{\text{К}}) = T_{\text{К}} / (T_{\text{Н}}^{0,5} \cdot Q_{\text{П}}^0 \cdot C_{\text{К}}^0 \cdot V_{\text{К}}^0) = 18,41$$

$$\pi(\Delta P) = \Delta P / (T_{\text{Н}}^{-0,5} \cdot Q_{\text{П}}^1 \cdot C_{\text{К}}^{0,5} \cdot V_{\text{К}}^{-0,33}) = 3,07 \cdot 10^{-2}$$

$$\pi(F_{\text{Ф}}) = F_{\text{Ф}} / (T_{\text{Н}}^{-0,5} \cdot Q_{\text{П}}^1 \cdot C_{\text{К}}^{0,5} \cdot V_{\text{К}}^{0,33}) = 1,07 \cdot 10^{-3}$$

$$\pi(\tau) = \tau / (T_{\text{Н}}^{-0,5} \cdot Q_{\text{П}}^0 \cdot C_{\text{К}}^{-0,5} \cdot V_{\text{К}}^{0,33}) = 32233,04$$

Таблица 5.2 – Наименование и размерность параметров для определения полной деформации

№	Параметр	Обозначение	Размерность	Показатели степени размерностей в единицах СИ				Заданное значение	Независимые параметры по размерностям
				M	T	L	Q		
1	Объём камеры	V_K	m^3	0	0	3	0	$9 \cdot 10^{-2}$	да
2	Влажность паровоздушной среды	$\phi_{п.с}$	кг/кг	0	0	0	0	0,97	
3	Время	τ	с	0	1	0	0	360	
4	Температура начальная	T_H	К	0	0	0	1	323	да
5	Температура конечная	T_K	К	0	0	0	1	331	
6	Перепад давлений	ΔP	кг/(с ² м)	1	-2	-1	0	$16,5 \cdot 10^3$	
7	Усилие формования	F_F	кг·м/с ²	1	-2	1	0	577,5	
8	Приформовочное давление	$P_{П}$	кг/(с ² м)	1	-2	-1	0	$0,2 \cdot 10^6$	
9	Толщина кожи хромового дубления	d	м	0	0	1	0	$2,35 \cdot 10^{-3}$	
10	Паропроницаемость	$Q_{П}$	кг/(м ² с)	1	-1	-2	0	$107,73 \cdot 10^3$	да
11	Удельная теплоёмкость кожи	C_K	м ² /(с ² К)	0	-2	2	-1	$1,61 \cdot 10^3$	да
12	Коэффициент диффузионного сопротивления	μ	-	0	0	0	0	3,2	

Обобщённый критерий подобия процесса фиксации (5.14) получен перемножением частных критериев подобия и подстановкой их в числитель при прямой зависимости выходного параметра от рассматриваемого и в знаменатель – при обратной.

Обобщённые критерии подобия процесса фиксации приводятся ниже.

$$\prod_{i=1}^k \pi_{i_{\Delta_{\text{полн}}}} = \frac{\pi_{\Delta_{\text{полн}}} \cdot \pi_d \cdot \pi_{P_{\text{П}}} \cdot \pi_{\phi_{\text{п.с}}} \cdot \pi_{t_K} \cdot \pi_{\tau} \cdot \pi_{F_F}}{\pi_{\Delta P} \cdot \pi_{\mu}}, i = \overline{1, k}, \text{ при } k = 9 \quad (5.14)$$

$$\prod_{i=1}^k \pi_{i_{\Delta_{\text{полн}}}} = 0,11.$$

Формирование обобщённого критериального выражения для полной деформации $\Delta_{\text{полн}}$ выполняется путём использования обобщённого критерия подобия функционирования системы, а затем решения полученного равенства относительно $\Delta_{\text{полн}}$.

Полученная обобщённая критериальная зависимость полной деформации (5.14) имеет вид:

$$\Delta_{\text{полн}} = \frac{d \cdot P_{\text{п}} \cdot t_{\text{к}} \cdot \varphi_{\text{пс}} \cdot \tau \cdot F_{\text{ф}} \cdot t_{\text{н}}}{\Delta P \cdot \mu \cdot V_{\text{к}} \cdot C_{\text{к}}^{0,5} \cdot Q_{\text{п}}} \cdot 0,11 \quad (5.15)$$

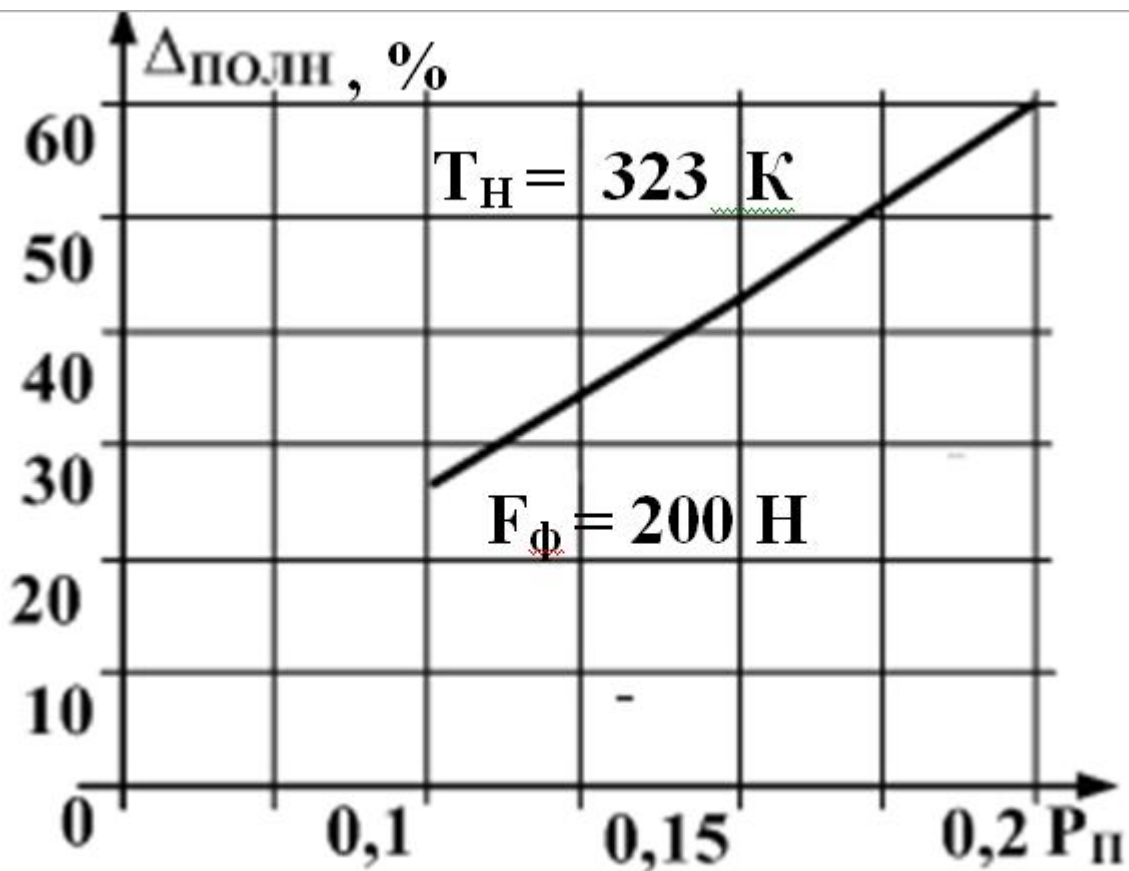


Рис. 5.5. Зависимость полной деформации от усилия прижатия

5.4.3. Математическая модель подобия функционирования подсистемы «технология-сушка»

На основании методики приведённой ранее в общем виде получена математическая модель процесса сушки.

Функциональная зависимость выходного параметра I интенсивности сушки от ряда определяющих её состояние параметров (табл. 5.3) составляемая в соответствии с методом ПФТС [7, 32, 33, 123] приведена ниже:

$$I = f(d, m_3, V_{M.K.}, Q_{\Pi}, C_K, \mu, \varphi_{\Pi C}, T_H, T_K, P_H, P_K, \tau, Q_T, K, P_{\Pi}, \Delta P; F_{\Phi}, V_K, D, \rho, C_B, C_{\Pi O}, R_{\Pi O})) \quad (5.16)$$

Частные критерии подобия π_i получены используя специально разработанную программу KriNN [123]. Для получения частных критериев подобия необходимо выбрать комплекс независимых параметров, который формируется из условия независимости размерностей (в единой системе измерений). Причём количество независимых параметров должно быть равно числу основных единиц измерения СИ [26, 166].

В качестве независимых параметров применяются (табл. 5.3) начальная температура T_H , начальное давление в камере P_H , удельная теплоёмкость кожи C_K , объём камеры V_K , паропроницаемость Q_{Π} .

Значения частных π -критериев процесса сушки

$$\begin{aligned} \pi(I) &= I / (T_H^{0,5} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-0,5} \cdot V_K^{-0,33}) = 1,23 \cdot 10^{-8} \\ \pi(d) &= d / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^{0,33}) = 5,24 \cdot 10^{-3} \\ \pi(m_3) &= m_3 / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-1} \cdot V_K^1) = 1,96 \\ \pi(V_{M.K.}) &= V_{M.K.} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 0,25 \\ \pi(Q_{\Pi}) &= Q_{\Pi} / (T_H^{-0,5} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-0,5} \cdot V_K^0) = 3973,54 \\ \pi(\mu) &= \mu / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 3,2 \\ \pi(\varphi_{\Pi C}) &= \varphi_{\Pi C} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 0,55 \\ \pi(T_K) &= T_K / (T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 1,02 \\ \pi(P_K) &= P_K / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 2,5 \\ \pi(\tau) &= \tau / (T_H^{-0,5} \cdot P_H^0 \cdot C_K^{-0,5} \cdot V_K^{0,33}) = 592597,23 \\ \pi(D) &= D / (T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^{-0,33}) = 4,19 \cdot 10^{-11} \\ \pi(\rho) &= \rho / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-1} \cdot V_K^0) = 6,53 \\ \pi(C_B) &= C_B / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0) = 1,19 \\ \pi(R_{\Pi O}) &= R_{\Pi O} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0) = 298,13 \\ \pi(C_{\Pi O}) &= C_{\Pi O} / (T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0) = 4,37 \\ \pi(Q_T) &= Q_T / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot C_K^0 \cdot V_K^1) = 1,13 \\ \pi(K) &= K / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 3 \end{aligned}$$

Таблица 5.3 – Наименование и размерность параметров для определения интенсивности процесса сушки

№	Параметр	Обозначение	Размерность	Показатели степени размерностей в единицах СИ				Заданное значение	Независимые параметры по размерностям
				M	T	L	Q		
1	Объём камеры	V_K	m^3	0	0	3	0	$9 \cdot 10^2$	да
2	Коэффициент диффузии пара	D	m^2/c	0	-1	2	0	$0,51 \cdot 10^{-4}$	
3	Плотность пара в условиях вакуума	ρ	$кг/м^3$	1	0	-3	0	$24 \cdot 10^{-2}$	
4	Удельная теплоёмкость воды	C_B	$м^2/(с^2К)$	0	-2	2	-1	$1,925 \cdot 10^3$	
5	Удельная теплоёмкость парообразования	$C_{по}$	$м^2/(с^2К)$	0	-2	2	-1	$2,018 \cdot 10^3$	
6	Удельная теплота парообразования	$R_{по}$	$м^2/с^2$	0	-2	2	0	$480 \cdot 10^3$	
7	Влажность паровоздушной среды	$\varphi_{пс}$	$кг/кг$	0	0	0	0	0,55	
8	Количество теплоты	Q_T	$кг м^2/с^2$	1	-2	2	0	2050	
9	Время сушки	τ	$с$	0	1	0	0	360	
10	Температура начальная	T_H	$К$	0	0	0	1	338	да
11	Температура конечная	T_K	$К$	0	0	0	1	348	
12	Начальное давление в камере	P_H	$кг/(с^2 м)$	1	-2	-1	0	$20 \cdot 10^3$	да
13	Конечное давление в камере	P_K	$кг/(с^2 м)$	1	-2	-1	0	$50 \cdot 10^3$	
14	Коэффициент цикличности	K	-	0	0	0	0	3	
15	Масса образца	m_3	$кг$	1	0	0	0	$6,5 \cdot 10^{-3}$	
16	Толщина кожи хромового дубления	d	$м$	0	0	1	0	$2,35 \cdot 10^{-3}$	
17	Объём микрокапилляров	$V_{м.к.}$	$м^3$	0	0	3	0	$0,257 \cdot 10^{-3}$	
18	Паропроницаемость	$Q_{п}$	$кг/(м^2с)$	1	-1	-2	0	$107,73 \cdot 10^3$	
19	Удельная теплоёмкость кожи	C_K	$м^2/(с^2К)$	0	-2	2	-1	$1,61 \cdot 10^3$	да
20	Коэффициент диффузионного сопротивления	μ	-	0	0	0	0	3,2	

Обобщённый критерий подобия процесса сушки (5.17) получен перемножением частных критериев подобия и подстановкой их в числитель при прямой зависимости выходного параметра от рассматриваемого и в знаменатель – при обратной.

Обобщённый критерий подобия процесса сушки приводятся ниже.

$$\prod_{i=1}^k \pi_{i_{\text{Сушка}}} = \frac{\pi_{I_{\text{Сушки}}} \cdot \pi_d \cdot \pi_{m3} \cdot \pi_{V_{\text{М.К.}}} \cdot \pi_{Q_{\text{П}}} \cdot \pi_p \cdot \pi_{C_{\text{ПО}}} \cdot \pi_{Q_T} \cdot \pi_D \cdot \pi_{\varphi_{\text{П.С}}} \cdot \pi_{t_K} \cdot \pi_K}{\pi_{P_K} \cdot \pi_{C_B} \cdot \pi_{R_{\text{ПО}}} \cdot \pi_{\mu} \cdot \pi_{\tau}}, i = \overline{1, k}, \text{ при } k = 17 \quad (5.17)$$

$$\prod_{i=1}^k \pi_{i_{\text{Сушка}}} = 2,09$$

Формирование обобщённого критериального выражения для интенсивности I сушки выполняется путём использования обобщённого критерия подобия функционирования системы, а затем решения полученного равенства относительно I .

Полученная обобщённая критериальная зависимость интенсивности процесса сушки (5.18) имеет вид:

$$I_{\text{Суш.}} = \frac{d \cdot m \cdot V_{\text{М.К.}} \cdot t_K \cdot C_K^{3,5} \cdot \varphi \cdot C_{\text{ПО}} \cdot Q_T \cdot D \cdot \varphi_{\text{П.С}} \cdot Q_{\text{П}} \cdot K}{l_H^{0,5} \cdot P_K \cdot C_B \cdot R_{\text{ПО}} \cdot V_K^{1,33} \cdot P_H^4 \cdot \mu \cdot \tau} \cdot 2,09. \quad (5.18)$$

На основе обобщённой критериальной зависимости интенсивности сушки [72], был получен следующий график (рис. 5.6).

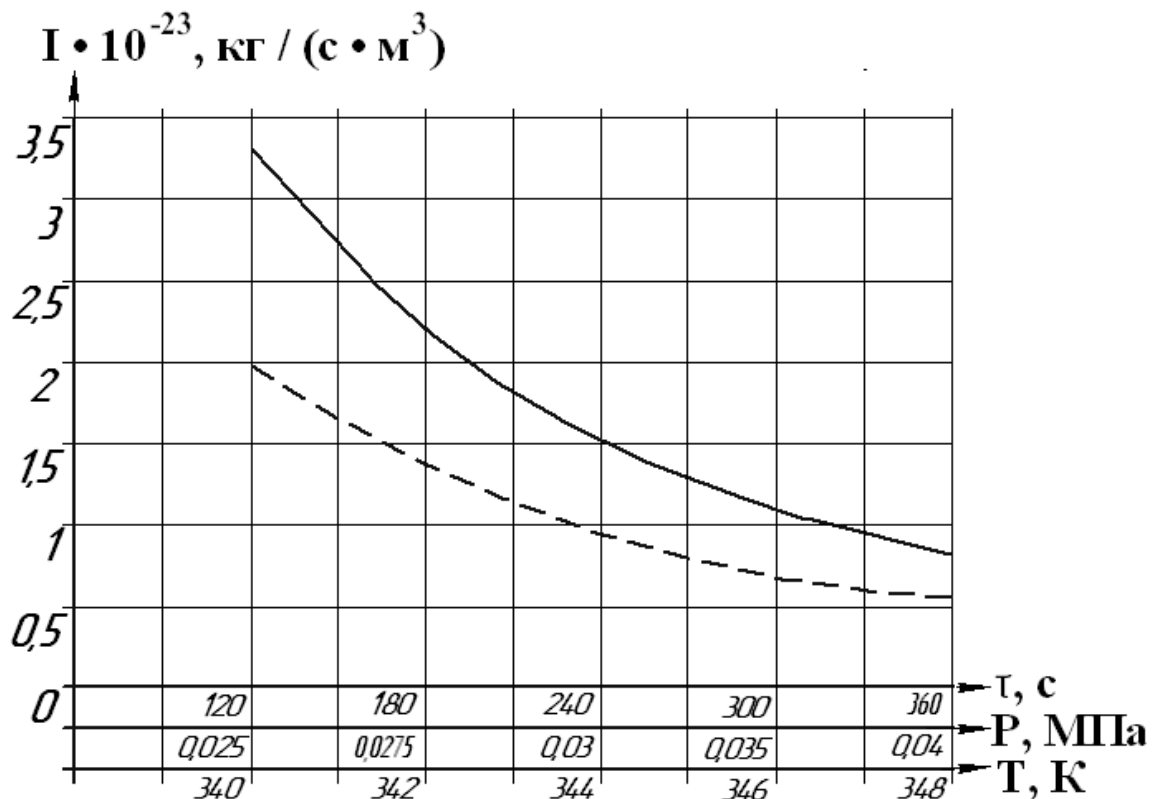


Рис. 5.6. Зависимости интенсивности сушки от способа подачи пара, времени, температуры и давления:
 — при подаче пара с бахтармянной стороны;
 - - - при подаче пара с лицевой стороны

5.4.4. Математическая модель подобия функционирования подсистемы «Технология – влажно-тепловая обработка»

На основании методики приведённой ранее в общем виде получена математическая модель процесса влажно-тепловой обработки.

Функциональная зависимость выходного параметра I интенсивности влажно-тепловой обработки от ряда определяющих её состояние параметров (табл. 5.4) составляемая в соответствии с методом ПФТС [7, 32, 123] приведена ниже:

В соответствии с методом ПФТС составляется функциональная зависимость выходного параметра I интенсивность процесса влажно-тепловой обработки от ряда определяющих её состояние параметров, представленных выше (табл. 5.4):

$$I = f(d, m_3, V_{\text{м.к.}}, Q_{\text{п}}, C_{\text{к}}, \mu, \varphi_{\text{пс}}, T_{\text{н}}, T_{\text{к}}, P_{\text{н}}, P_{\text{к}}, \tau, Q_{\text{т}}, K, R_{\text{п}}, \Delta P; F_{\text{ф}}, V_{\text{к}}, D, \rho, C_{\text{в}}, C_{\text{по}}, R_{\text{по}}). \quad (5.19)$$

Частные критерии подобия π_i получены используя специально разработанную программу KriNN [123]. Для получения частных критериев подобия необходимо выбрать комплекс независимых параметров, который формируется из условия независимости размерностей (в единой системе измерений). Причём количество независимых параметров должно быть равно числу основных единиц измерения СИ [26, 166].

В качестве независимых параметров применяются (табл. 5.4) начальная температура $T_{\text{н}}$, начальное давление в камере $P_{\text{н}}$, удельная теплоёмкость кожи $C_{\text{к}}$, объём камеры $V_{\text{к}}$, паропроницаемость $Q_{\text{п}}$.

Значения частных π -критериев процесса влажно-тепловой обработки

$$\pi(I) = I / (T_{\text{н}}^{-0.5} \cdot P_{\text{н}}^1 \cdot C_{\text{к}}^{-0.5} \cdot V_{\text{к}}^{0.33}) = 3,05 \cdot 10^{-25}$$

$$\pi(d) = d / (T_{\text{н}}^0 \cdot P_{\text{н}}^0 \cdot C_{\text{к}}^0 \cdot V_{\text{к}}^{0.33}) = 5,24 \cdot 10^{-3}$$

$$\pi(m_3) = m_3 / (T_{\text{н}}^{-1} \cdot P_{\text{н}}^1 \cdot C_{\text{к}}^{-1} \cdot V_{\text{к}}^1) = 1,59$$

$$\pi(V_{\text{м.к.}}) = V_{\text{м.к.}} / (T_{\text{н}}^0 \cdot P_{\text{н}}^0 \cdot C_{\text{к}}^0 \cdot V_{\text{к}}^0) = 0,25$$

$$\pi(Q_{\text{п}}) = Q_{\text{п}} / (T_{\text{н}}^{-0.5} \cdot P_{\text{н}}^1 \cdot C_{\text{к}}^{-0.5} \cdot V_{\text{к}}^0) = 3271,86$$

$$\pi(\mu) = \mu / (T_{\text{н}}^0 \cdot P_{\text{н}}^0 \cdot C_{\text{к}}^0 \cdot V_{\text{к}}^0) = 3,2$$

$$\pi(\varphi_{\text{пс}}) = \varphi_{\text{пс}} / (T_{\text{н}}^0 \cdot P_{\text{н}}^0 \cdot C_{\text{к}}^0 \cdot V_{\text{к}}^0) = 0,97$$

$$\pi(T_{\text{к}}) = T_{\text{к}} / (T_{\text{н}}^1 \cdot P_{\text{н}}^0 \cdot C_{\text{к}}^0 \cdot V_{\text{к}}^0) = 1,03$$

$$\pi(P_{\text{к}}) = P_{\text{к}} / (T_{\text{н}}^0 \cdot P_{\text{н}}^1 \cdot C_{\text{к}}^0 \cdot V_{\text{к}}^0) = 1,66$$

$$\pi(\tau) = \tau / (T_{\text{н}}^{-0.5} \cdot P_{\text{н}}^0 \cdot C_{\text{к}}^{-0.5} \cdot V_{\text{к}}^{0.33}) = 195180,75$$

$$\pi(D)=D/(T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^{-0,33})=6,57 \cdot 10^{-11}$$

$$\pi(\rho)=\rho/(T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-1} \cdot V_K^0)=5,53$$

$$\pi(C_B)=C_B/(T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0)=1,18$$

$$\pi(R_{\text{по}})=R_{\text{по}}/(T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0)=298,13$$

$$\pi(C_{\text{по}})=C_{\text{по}}/(T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0)=4,48$$

$$\pi(Q_T)=Q_T/(T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot C_K^0 \cdot V_K^1)=0,94$$

Таблица 5.4 – Наименование и размерность параметров для определения интенсивности процесса ВТО

№	Параметр	Обозначение	Размерность	Показатели степени размерностей в единицах СИ				Заданное значение	Независимые параметры по размерностям
				M	T	L	Q		
1	Объём камеры	V_K	м^3	0	0	3	0	$9 \cdot 10^{-2}$	да
2	Коэффициент диффузии пара	D	$\text{м}^2/\text{с}$	0	-1	2	0	$0,78 \cdot 10^{-4}$	
3	Плотность пара в условиях вакуума	ρ	$\text{кг}/\text{м}^3$	1	0	-3	0	$25 \cdot 10^{-2}$	
4	Удельная теплоёмкость воды	C_B	$\text{м}^2/(\text{с}^2\text{К})$	0	-2	2	-1	$1,915 \cdot 10^3$	
5	Удельная теплоёмкость парообразования	$C_{\text{по}}$	$\text{м}^2/(\text{с}^2\text{К})$	0	-2	2	-1	$2,018 \cdot 10^3$	
6	Удельная теплота парообразования	$R_{\text{по}}$	$\text{м}^2/\text{с}^2$	0	-2	2	0	$480 \cdot 10^3$	
7	Влажность паровоздушной среды	$\varphi_{\text{ПС}}$	$\text{кг}/\text{кг}$	0	0	0	0	0,97	
8	Количество теплоты	Q_T	$\text{кг м}^2/\text{с}^2$	1	-2	2	0	2050	
9	Время ВТО	τ	с	0	1	0	0	120	
10	Температура начальная	T_H	К	0	0	0	1	330	да
11	Температура конечная	T_K	К	0	0	0	1	340	
12	Начальное давление в камере	P_H	$\text{кг}/(\text{с}^2 \text{ м})$	1	-2	-1	0	$24 \cdot 10^3$	да
13	Конечное давление в камере	P_K	$\text{кг}/(\text{с}^2 \text{ м})$	1	-2	-1	0	$40 \cdot 10^3$	
14	Масса заготовок	m_3	кг	1	0	0	0	$6,5 \cdot 10^{-3}$	
15	Толщина кожи хромового дубления	d	м	0	0	1	0	$2,35 \cdot 10^{-3}$	
16	Объём микрокапилляров	$V_{\text{м.к.}}$	м^3	0	0	3	0	$0,257 \cdot 10^{-3}$	
17	Паропроницаемость	$Q_{\text{П}}$	$\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$	1	-1	-2	0	$107,73 \cdot 10^3$	
18	Удельная теплоёмкость кожи	C_K	$\text{м}^2/(\text{с}^2\text{К})$	0	-2	2	-1	$1,61 \cdot 10^3$	да
19	Коэффициент диффузионного сопротивления	μ	-	0	0	0	0	3,2	

Обобщённые критерии подобия для каждого из рассчитываемых процессов (5.20) получены перемножением частных критериев подобия и подстановкой их в числитель при прямой зависимости выходного параметра от рассматриваемого и в знаменатель – при обратной.

Обобщённые критерии подобия процессов приводятся ниже.

$$\prod_{i=1}^k \pi_{i_{\text{ВТО}}} = \frac{\pi_{I_{\text{ВТО}}} \cdot \pi_d \cdot \pi_{m3} \cdot \pi_{V_{\text{М.К.}}} \cdot \pi_{Q_{\text{П}}} \cdot \pi_p \cdot \pi_{C_{\text{ПО}}} \cdot \pi_{Q_T} \cdot \pi_D \cdot \pi_{\varphi_{\text{П.С.}}} \cdot \pi_{t_K}}{\pi_{P_K} \cdot \pi_{C_B} \cdot \pi_{R_{\text{ПО}}} \cdot \pi_{\mu} \cdot \pi_{\tau}}, i = \overline{1, k}, \text{ при } k = 16 \quad (5.20)$$

$$\prod_{i=1}^k \pi_{i_{\text{ВТО}}} = 0,39.$$

Формирование обобщённого критериального выражения для интенсивности I выполняется путём использования обобщённого критерия подобия функционирования системы, а затем решения полученного равенства относительно I .

Полученные обобщённые критериальные зависимости интенсивности влажно-тепловой обработки (5.20) имеют вид:

$$I_{\text{ВТО}} = \frac{d \cdot m \cdot V_{\text{М.К.}} \cdot t_K \cdot C_K^{3,5} \cdot \rho \cdot C_{\text{ПО}} \cdot Q_T \cdot D \cdot \varphi_{\text{П.С.}} \cdot Q_{\text{П}}}{t_H^{0,5} \cdot P_K \cdot C_B \cdot R_{\text{ПО}} \cdot V_K^{1,33} \cdot P_H^4 \cdot \mu \cdot \tau} \cdot 0,39. \quad (5.21)$$

На основе обобщённых критериальных зависимостей интенсивности влажно-тепловой обработки [142], были получены следующие графики (рис. 5.7).

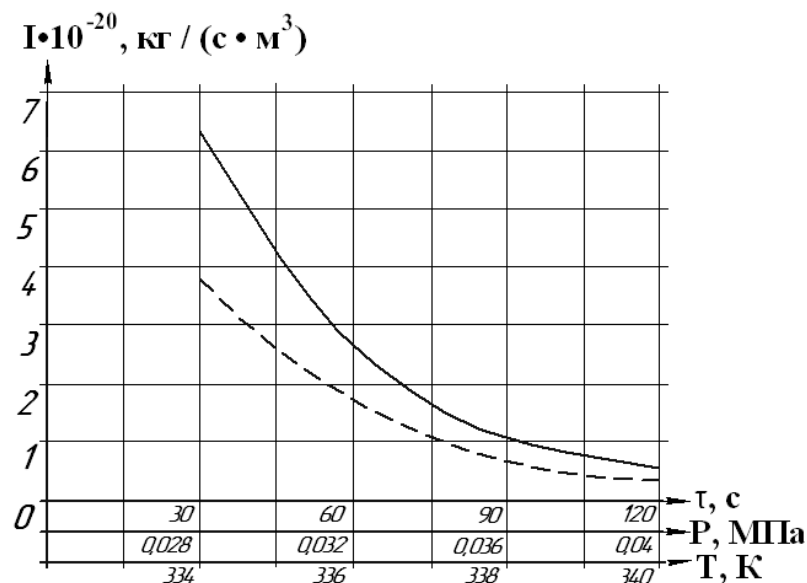


Рис. 5.7. Зависимости интенсивности влажно-тепловой обработки от способа подачи пара, времени, температуры и давления:

— при подаче пара с бахтармянной стороны;
 - - - при подаче пара с лицевой стороны

Таким образом, применение метода ПФТС позволяет получить математические модели подсистем «технологии» и на их основе прогнозировать минимальную длительность всех гигротермических операций, обеспечивающих снижение энергопотребления в 2,2–2,8 раза.

5.5. Основные положения и условия метода стохастического подобия функционирования технических систем при исследовании процессов интенсифицированной гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов

На первом этапе создания оборудования интенсифицированная гигротермическая обработка представляется как система, характеризующаяся совокупностью подсистем (рис. 5.3).

Основные положения теории подобия функционирования систем [123] позволяют системно исследовать процессы интенсифицированной гигротермической обработки (ИГО) кожевенно-обувных материалов как в детерминированных, так и в стохастических условиях функционирования. Система (ИГО) включает в качестве подсистем «объект технологии», «технологию гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов», «средства технологии» и «продукцию». В подразделах 5.4–5.5 эти подсистемы исследовались в условиях детерминированных связей функциональных характеристик и выходных параметров.

В процессе функционирования подсистем значения независимых параметров могут изменяться, но значения выходных характеристик Y_i могут как изменяться, так и оставаться неизменными. Последнее связано с тем, что однозначное изменение не всех независимых параметров приводит к такому же однозначному изменению функциональной характеристики. Кроме того, даже однотипные по параметрам и физическим процессам подсистемы при их функционировании имеют разброс (поля допусков) значений конструктивных, технологических и физических характеристик. Так, образцы, выкроенные даже из одной кожи хромового дубления, представляющей подсистему «объект технологии», могут отличаться объёмом микрокапилляров в преде-

лах от 22 до 28 % [94]. Это может привести к стохастическому характеру значений выходных характеристик функционирования подсистем, если в качестве их рассматриваются показатели физико-механических свойств кожевенно-обувных материалов. Поэтому, в зависимости от требуемой точности и достоверности исследования подобия функционирования в отдельных случаях необходимо рассматривать стохастическое подобие исследуемых подсистем системы ИГО.

Разработка на основе метода стохастического подобия функционирования технических систем обобщённых моделей и критериев, связывающих физико-механические свойства обрабатываемых материалов с параметрами оборудования для интенсифицированного гигротермического воздействия позволит получить аналитические зависимости для расчёта параметров процессов ИГО, показателей физико-механических свойств обрабатываемых материалов, обеспечивающих максимально возможную производительность обработки.

5.5.1. Методика формирования математических моделей стохастического подобия функционирования подсистем интенсифицированной гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов

Как известно, исследования технических систем методом подобия функционирования [123] основаны на трёх моделях: структурно-функциональных, математических и моделях принятия решений. Методика построения структурно-функциональных моделей и математических, устанавливаемых обобщённые критерии подобия и обобщённые критериальные выражения для процессов интенсифицированной гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов, основанной на заполнении (удалении) микрокапиллярной влаги, рассмотрена ранее в разделах 5.1-5.4.

Исследование же этих процессов для тех случаев, когда в качестве выходных характеристик подсистем выбираются показатели физико-механических свойств кожевенно-обувных материалов, строение которых имеет стохастическую природу, требует рассмотрения их стохастического подобия функционирования [37].

Разработанная методика формирования математических моделей стохастического подобиа предусматривает [77]:

1) Получение функциональной зависимости выходной характеристики системы от определяющих ее состояние параметров входных, задающих, возмущающих воздействий и внутренних (структурных) параметров системы.

2) Формирование методом нулевых размерностей (как правило) выражений для частных критериев подобиа в соответствии с исходной функциональной зависимостью.

3) Объединение полученных выражений для частных критериев подобиа по физической значимости и целевой задаче.

4) Определение численных значений объединённых критериев по номинальным значениям параметров функционирования подсистем ИГО с целью формирования обобщённых критериальных выражений.

5) Получение из обобщённых критериальных выражений выходной характеристики подсистемы.

6) Установление граничных значений для выходной характеристики функционирования подсистем ИГО и параметров функционирования.

7) Определение значения выходной характеристики подсистемы (Y_i) в стохастическом смысле вероятностным методом, исходя из возможных отклонений независимых параметров (X_j, Z_j, S_j) от их номинальных значений из-за стохастического строения кожи. Для этого производится разложение полученного обобщённого критериального выражения в ряд Тейлора:

$$Y_i = f_i(\pi_{yi}, X_j, Z_j, S_j) = \pi_{yi} \left[f_i(M_{xj}, M_{zj}, M_{sj}) + \frac{\partial f_i}{\partial X_j} (X_j - M_{xj}) + \frac{\partial f_i}{\partial Z_j} (Z_j - M_{zj}) + \frac{\partial f_i}{\partial S_j} (S_j - M_{sj}) \right] \quad (5.22)$$

где M_{xj}, M_{zj}, M_{sj} – математические ожидания значений независимых параметров;

$\frac{\partial f_i}{\partial X_j}, \frac{\partial f_i}{\partial Z_j}, \frac{\partial f_i}{\partial S_j}$ – частные производные функции связи по независимым параметрам.

В качестве математических ожиданий принимаются номинальные значения независимых параметров.

8) Построение графических зависимостей выходной характеристики функционирования от независимых параметров с учётом стохастического строения кожи.

9) Определение зоны гарантированного гигротермического воздействия на коженно-обувные материалы с учётом их стохастического строения.

10) Проверка возможности назначения минимальных по времени режимов обработки из сопоставления суммы относительных отклонений (ошибок) независимых параметров от их номинальных значений в связи со стохастическим строением кожи с пределом относительных допусков на изменение выходной характеристики рассматриваемой подсистемы:

$$-\delta_{yi_0}^H \leq (\alpha_j \delta_{xj} + \beta_j \delta_{zj} + \gamma_j \delta_{sj})_i \leq \delta_{yi_0}^B, \quad (5.23)$$

где $\delta_{yi_0}^H, \delta_{yi_0}^B$ – относительное отклонение (ошибки) номинальных значений характеристик функционирования подсистемы, выражение в скобках – функционал (Φ) независимых параметров в отклонениях;

$\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$ – показатели степени при соответствующих независимых параметрах в критериальных зависимостях.

$\delta_{x_j}, \delta_{z_j}, \delta_{s_j}$ – относительные отклонения (ошибки) значений независимых параметров в критериальных зависимостях, равные:

$$\delta_{x_j} = \frac{X_j - X_{j_0}}{X_j}; \quad \delta_{z_j} = \frac{Z_j - Z_{j_0}}{Z_j}; \quad \delta_{s_j} = \frac{S_j - S_{j_0}}{S_j}, \quad (5.24)$$

По рассмотренной методике были получены частные π -критерии подобия, объединённые по физической значимости (табл. 5.5).

Объединённые критерии [69], полученные при принятых условиях однозначности (табл. 5.6) для подсистемы «увлажнение» и условиях однозначности для других подсистем системы ИГО и, исходя из условия подобия функционирования рассматриваемых подсистем: $\pi_i = idem = const.$, приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Объединённые по целевой задаче критерии подобия функционирования подсистем системы интенсифицированной гигротермической обработки с применением вакуума

Объединенный критерий подобия \ Подсистемы ИГО	«Увлажнение»	«Сушка»	«Влажно-тепловая обработка»	«Фиксация»
π_{Ki} – критерий эффективности обработки кожи	$\pi_{Ky} = \frac{P_H^{3,5} \cdot \tau^2}{T_H \cdot \rho^{0,5} E_k} A$ = 50 ,7	$\pi_{Kc} = \frac{P_H^3 \cdot \tau^1 \cdot \rho}{T_H \cdot \Delta \kappa} A$ = 70 ,4	$\pi_{K\tau o} = \frac{P_H^{2,5} \cdot \tau^2}{T_H \cdot \rho^{0,5} \cdot \Delta \kappa} A$ = 15 ,5	$\pi_{K\phi} = \frac{P_H^3 \cdot \tau \cdot \rho^3}{T_H \cdot \Delta \kappa} A$ = 80 · 10 ⁻⁴
	$A = \frac{d}{m} \cdot \frac{1}{c_k \cdot Q_n \cdot \mu}$			$A = \frac{d}{F\phi} \cdot \frac{1}{c_k \cdot Q_n}$
π_{Ti} – критерий интенсивности процесса	$\pi_{Ti} = \frac{T_K \cdot P_H^{1,5}}{T_H \cdot P_K \cdot D \cdot \tau \cdot \sqrt{\rho}}$			$\pi_{T\phi} = \frac{P_H^2}{T_K \cdot p^2}$
	$\pi_{Ty}=5494$	$\pi_{Tc} = 4797$	$\pi_{T\tau o}=15550$	$\pi_{T\phi}=3,91$
	При совмещении операций $\pi_{T\Sigma} = \frac{T_n}{P_n^{0,5} \cdot D \cdot I \cdot \mu} \cdot \frac{P_K}{T_K \cdot \tau^2 \cdot \rho^{1,5}} = 1,78 \cdot 10^{-26}$			
π_{Ci} – критерий пригодности оборудования для конкретной операции	$\pi_{Ci} = \frac{V_K \cdot P_H^2}{Q_T \cdot C_{по} \cdot \rho}$			
	$\pi_{Cy} = 34 ,6$	$\pi_{Cc} = 38 ,3$	$\pi_{C\tau o} = 36$	$\pi_{C\phi} = 38,3$

5.5.2. Математическая модель стохастического подобию функционирования подсистемы интенсифицированной гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов – «увлажнение»

В соответствие с приведённой выше методикой:

1) Формируется функциональная зависимость по выходной характеристике подсистемы- E_K (модуля упругости кожи) от определяющих её параметров (табл. 5.6), которая имеет вид:

$$E_K = f(d, m_3, V_{M.K.}, Q_{П}, C_K, \mu, \Phi_{П.С.}, I, T_H, T_K, P_H, P_K, \tau, Q_T, V_K, D, \rho, C_{ПО}, R_{ПО}), \quad (5.25)$$

Таблица 5.6 – Условия однозначности подсистем «объект технологии», «технология» при вакуумно-сорбционном увлажнении

№	Параметры	Обозначение	Размерность	Рекомендуемые условия однозначности* Увлажнение
Средства технологии				
1	Объём камеры	V_K	m^3	$9 \cdot 10^{-2}$
2	Коэффициент диффузии пара	D	m^2/c	$0,58 \cdot 10^{-4}$
3	Плотность пара в условиях вакуума	ρ	$кг/м^3$	$26 \cdot 10^{-2}$
4	Удельная теплоёмкость воды	C_B	$Дж/(кг \cdot K)$	$1,915 \cdot 10^3$
5	Удельная теплоёмкость пара	$C_{ПО}$	$Дж/(кг \cdot K)$	$2,018 \cdot 10^3$
6	Удельная теплота парообразования	$R_{ПО}$	$Дж/(кг)$	$480 \cdot 10^3$
7	Влажность паровоздушной среды	$\Phi_{П.С.}$	%	97
8	Количество теплоты	Q_T	Дж	2050
Технология				
9	Время	τ	с	360
10	Температура начальная	T_H	К	328
11	Температура конечная	T_K	К	332
12	Начальное давление в камере	P_H	Па	$20 \cdot 10^3$
13	Конечное давление в камере	P_K	Па	$50 \cdot 10^3$
14	Коэффициент цикличности	K		-
15	Интенсивность	I	$кг/(с \cdot m^3)$	$4,1 \cdot 10^{-24}$
Объект, Продукция				
16	Масса заготовок	m_3	кг	$2,0 \cdot 10^{-3}$
17	Толщина кожи хромового дубления	d	м	$1,6 \cdot 10^{-3}$
18	Объём микрокапилляров	$V_{M.K.}$	m^3	$0,257 \cdot 10^{-3}$
19	Паропроницаемость	$Q_{П}$	$кг/(m^2 \cdot c)$	$107,73 \cdot 10^3$
20	Удельная теплоёмкость кожи	C_K	$Дж/(кг \cdot K)$	$1,61 \cdot 10^3$
21	Коэффициент диффузионного сопротивления: – с бахтармянной стороны; – с лицевой стороны	μ		3,2 5,35
22	Конечный модуль упругости	E_K	Па	$22 \cdot 10^6$
26	Остаточная деформация	Δ_K	м/м	29
27	Предел прочности при растяжении	δ_P	Па	$19 \cdot 10^6$
* рекомендуемые режимы приняты на основе апробированных экспериментальных и теоретических исследований процессов при увлажнении в данной работе с использованием вакуума.				

2) Для формирования частных критериев подобия функционирования подсистем используем программу расчёта критериев (KriNN), разработанную на кафедре «Машины и оборудование бытового и жилищно-коммунального назначения» ИСОиП (филиала) ДГТУ.

При этом в качестве независимых параметров принимаются: начальная температура - T_H , начальное давление в камере - P_H , время воздействия - τ , плотность паровоздушной среды – ρ .

Полученные выражения для частных критериев подобия имеют вид:

$$\begin{aligned}
 \pi(d) &= d / (T_H^0 \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^1 \cdot \rho^{-0,5}) = 1,0 \cdot 10^{-8} \\
 \pi(m_3) &= m_3 / (T_H^0 \cdot P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-0,5}) = 2,51 \cdot 10^{-17} \\
 \pi(V_{MK}) &= V_{MK} / (T_H^0 \cdot P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}) = 2,58 \cdot 10^{-19} \\
 \pi(E_K) &= E_K / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 1100 \\
 \pi(\Delta_K) &= E_K / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 29 \\
 \pi(\delta_{Kp}) &= \delta_{Kp} / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 950 \\
 \pi(Q_{II}) &= Q_{II} / (T_H^0 \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^0 \cdot \rho^{0,5}) = 1493,94 \\
 \pi(C_K) &= C_K / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 6,76 \\
 \pi(\mu) &= \mu / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 3,2 \\
 \pi(\varphi_{PC}) &= \varphi_{PC} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 0,97 \\
 \pi(T_K) &= T_K / (T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 1,02 \\
 \pi(P_K) &= P_K / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 2 \\
 \pi(D) &= D / (T_H^0 \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^1 \cdot \rho^{-0,5}) = 7,26 \cdot 10^{-5} \\
 \pi(C_B) &= C_B / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 8,04 \\
 \pi(R_{ПО}) &= R_{ПО} / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 2015,52 \\
 \pi(C_{ПО}) &= C_{ПО} / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 0,02 \\
 \pi(V_K) &= V_K / (T_H^0 \cdot P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}) = 9,04 \cdot 10^{-17} \\
 \pi(Q_T) &= Q_T / (T_H^0 \cdot P_H^{2,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}) = 1,02 \cdot 10^{-16} \\
 \pi(I) &= I / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^{-1} \cdot \rho^{-1}) = 5,67 \cdot 10^{-21}
 \end{aligned} \tag{5.26}$$

3) Объединяя полученные частные критерии π_{Qn} , π_{Ck} , π_{μ} , π_d , π_{m3} , π_{Ek} по физической значимости, путём последовательного деления одного частного π – критерия на последующий, получили π_{Ky} – критерий подобия, характеризующий физико-механические свойства обрабатываемого материала при увлажнении (критерий эффективности):

$$\pi_{Ky} = \frac{d}{m_3 \cdot E_K \cdot C_K \cdot Q_{II} \cdot \mu} \cdot \frac{P_H^{3,5} \cdot \tau^2}{T_H \cdot \rho^{0,5}} \tag{5.27}$$

4) Численное значение объединённого критерия π_{Ky} после подстановки номинальных значений независимых параметров: $P_H = 20 \cdot 10^3$ Па; $T_H = 328$ °К; $\tau = 360$ с; $\rho = 0,26$ кг/м³ в уравнение 5.27 составило:

$$\pi_{Ky} = \frac{2,0 \cdot 10^{-3} \cdot (20 \cdot 10^3)^{3,5} 360^2}{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 22 \cdot 10^6 \cdot 108 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^3 \cdot 3,2 \cdot 323 \cdot 26 \cdot 10^{-2}} = \frac{10492720}{205590} = 50,7$$

5) Выразим из уравнения 5.27 значение выходной характеристики E_K и введя коэффициент условной микрокапиллярной пористости Π , отнесённый к отношению $\frac{d}{m_\zeta}$, получим:

$$E_K = \frac{1}{\pi_{Ky}} \cdot \frac{d}{m_\zeta} \cdot \Pi \cdot \frac{1}{C_K \cdot Q_n \cdot \mu} \cdot \frac{P_H^{3,5} \cdot \tau^2}{T_H \cdot \rho^{0,5}} \quad (5.28)$$

6) Граничные значения выходной характеристики функционирования подсистемы «увлажнение» и независимых параметров установлены на основе экспериментальных исследований, выполненных в четвёртой главе:

$$\left. \begin{aligned} 10^6 \cdot 17,9 \leq E_K \leq 24,1 \cdot 10^6; \\ 0,02 \cdot 10^6 \leq P \leq 0,05 \cdot 10^6; \\ 328 \leq T \leq 333; \\ 120 \leq \tau \leq 360, \end{aligned} \right\} \quad (5.29)$$

7) После разложения в ряд Тейлора уравнения (5.28) получено выражение для выходной характеристики подсистемы в стохастическом смысле:

$$E_{Ki} = E_K + \frac{A}{\pi_{Ky}} \cdot \Pi \cdot \left[\frac{\partial f}{\partial P} \cdot (P_{cp} - P_i) + \frac{\partial f}{\partial T} \cdot (T_{cp} - T_i) + \frac{\partial f}{\partial \tau} \cdot (\tau_{cp} - \tau_i) + \frac{\partial f}{\partial \rho} \cdot (\rho_{cp} - \rho_i) \right] \quad (5.30)$$

где $A = \frac{d}{m} \cdot \frac{1}{C_K \cdot Q_n \cdot \mu}$ – коэффициент связи параметров, характеризующих физико-механические свойства кожи;

$f = \frac{P_n^{3,5} \cdot \tau^2}{T_H \cdot \rho}$ – функция связи по независимым параметрам;

Значения частных производных функций связи $f = \frac{P_H^{3,5} \tau^2}{T_H \rho^{0,5}}$ по независимым параметрам вычислены при подстановке в них их номинальных значений: $P = 20 \cdot 10^3$ Па; $T = 328$ °К; $\tau = 360$ с; $\rho = 0,26$ кг/м³ :

$$\frac{\partial f}{\partial P} = \frac{7\tau^2 P_H^{5/2}}{2T_H \sqrt{\rho}} = 16 \cdot 10^{13}, \text{ Па}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м} / \text{°К}; \quad \frac{\partial f}{\partial T} = \frac{-\tau^2 \cdot P_H^{3,5}}{T_H \sqrt{\rho}} = -87,0 \cdot 10^{16}, \text{ Па}^2 \cdot \text{кг} / \text{с} \cdot \text{°К};$$

$$\frac{\partial f}{\partial \tau} = \frac{2\tau P_H^{3,5}}{T_H \sqrt{\rho}} = 0,48 \cdot 10^{16}, \text{ Па}^2 \cdot \text{кг} / \text{с}^2 \cdot \text{°К}; \quad \frac{\partial f}{\partial \rho} = \frac{-\tau^2 P_H^{3,5}}{2T_H \rho^{3/2}} = -167 \cdot 10^{16}, \text{ Па}^2 \cdot \text{м}^{10} \cdot \text{с}^5.$$

Для нахождения средних значений параметров обработки $P_{\text{ср}}$, $T_{\text{ср}}$, $\tau_{\text{ср}}$, $\rho_{\text{ср}}$ использованы экспериментальные данные, полученные в главе 4 и приведённые в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Экспериментальные значения параметров процесса вакуумно-сорбционного увлажнения

Обозначение параметров	Размерность	Средние значения параметров					
S_j (время - τ)	с	120	180	240	300	360	420
X_j (давление - P)	Па	$25 \cdot 10^3$	$27 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	$40 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$
Z_j (температура - T)	К	328	329	330	330,5	331	333
R_j (плотность - ρ)	кг/м ³	$16 \cdot 10^{-2}$	$17 \cdot 10^{-2}$	$19 \cdot 10^{-2}$	$22 \cdot 10^{-2}$	$26 \cdot 10^{-2}$	$36 \cdot 10^{-2}$

8) После подстановки в выражение (5.30) численных значений параметров, соответствующих, например, времени обработки, равному 4-м минутам, получено значение Y_i :

$$Y_i = 22 \cdot 10^6 + [0,1 \cdot (12,6 \cdot 10^{-10}) / 50,7] \cdot [16 \cdot 10^{16} (30-20) - 87 \cdot 10^{16} (330-328) + 0,48 \cdot 10^{16} (240-360) - 167 \cdot 10^{16} (0,19-0,26)] = 23,4 \cdot 10^6, \text{ Па} \quad (5.31)$$

Построенные графические зависимости модуля упругости кожи - E_K от времени вакуумно-сорбционного увлажнения с учётом стохастического характера строения кожи (микрокапиллярная пористость Π кож хромового дубления варьируется от 0,1 до 0,4) приведены на рисунке 5.8.

Полученная величина Y_i (5.31) находится в пределах минимальных и максимальных её значений (5.29), но для установления подобия функционирования подсистем и в стохастическом смысле нужно, чтобы суммы относи-

тельных изменений (ошибок) этих комплексов, с учётом их корреляции от размерности характеристик функционирования, находились в пределах относительных допусков на изменения этих характеристик.

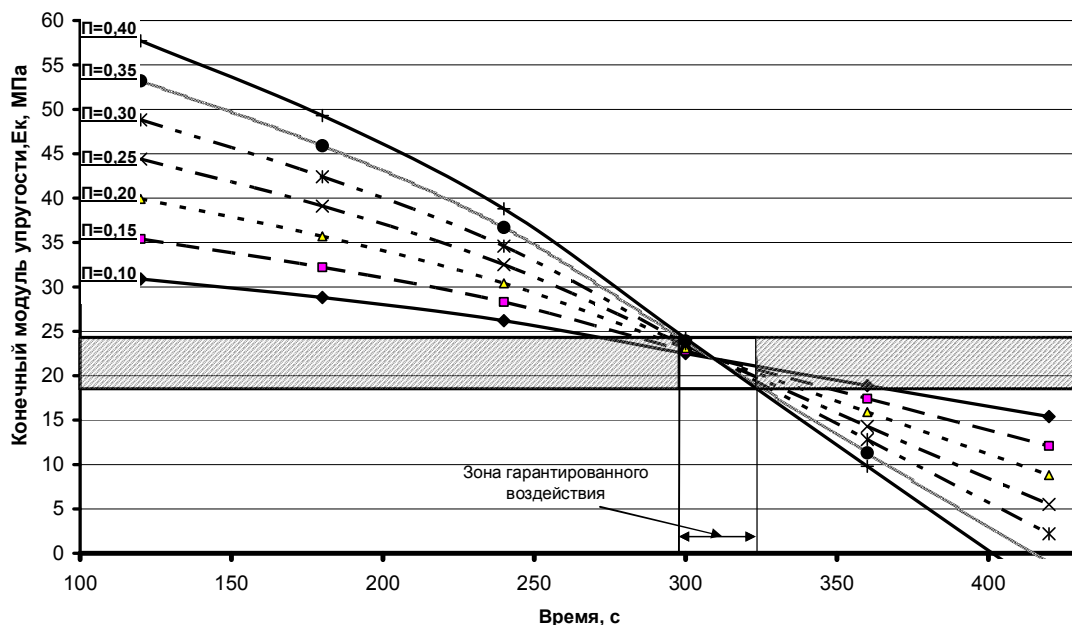


Рис. 5.8. Изменения конечного модуля упругости кож хромового дубления E_k от условной микрокапиллярной пористости – P при вакуумно-сорбционном увлажнении

9) Проведя на полученных графиках прямые, соответствующие верхней и нижней границам значений выходной характеристики, определим интервал времени, соответствующий гарантированному гигротермическому воздействию при увлажнении коженно-обувных материалов с учётом их стохастического строения (микрокапиллярной пористости).

10) Для установления подобия подсистем и в стохастическом смысле, нужно, чтобы суммы относительных изменений (ошибок) независимых параметров этих комплексов, с учётом их корреляции от размерности характеристик функционирования, находились в пределах относительных допусков на изменения этих характеристик.

Как показано в работе [123] должно выполняться следующее условие при асимметричных отклонениях Y_i .

$$-\delta_{y_0}^H \leq (\alpha_j \delta_{xj} + \beta_j \delta_{Zj} + \gamma_j \delta_{Sj} + \Delta_j \delta_{Rj}) \leq \delta_{y_0}^B, \quad (5.32)$$

где $\delta_{y_0}^H, \delta_{y_0}^B$ – относительное отклонение (ошибки) номинальных значений характеристик функционирования подсистемы.

Выражение в скобках неравенств называется функционалом - Φ_y независимых параметров в отклонениях, т.е.

$$\Phi_{yi} = (\alpha_j \delta_{xj} + \beta_j \delta_{Zj} + \gamma_j \delta_{Sj}), \quad (5.33)$$

где $\delta_{xj}, \delta_{Zj}, \delta_{Sj}$ – относительные отклонения (ошибки) значений независимых параметров в критериальных зависимостях, равные соответственно:

$$\delta_{xj} = \frac{X_j - X_{j_0}}{X_j}; \quad \delta_{Zj} = \frac{Z_j - Z_{j_0}}{Z_j}; \quad \delta_{Sj} = \frac{S_j - S_{j_0}}{S_j}; \quad \delta_{Rj} = \frac{R_j - R_{j_0}}{R_j}; \quad (5.34)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \Delta$ – соответствующие показатели степеней независимых параметров в функции связи (5.30).

Численные значения ошибок приведены ниже:

$$\delta_{xj} = \frac{X_j - X_{j_0}}{X_j} = (30-20)/30=0,33$$

$$\delta_{Zj} = \frac{Z_j - Z_{j_0}}{Z_j} = (330-328)/330=0,01$$

$$\delta_{Sj} = \frac{S_j - S_{j_0}}{S_j} = (240-360)/240=-0,5$$

$$\delta_{Rj} = \frac{R_j - R_{j_0}}{R_j} = (19-26)/19=-0,368$$

Численное значение функционала составит:

$$0,33 \cdot 3,5 + 0,01 \cdot 1 - 0,5 \cdot 0,368 \cdot 1 - 0,5 \cdot 2 = -0,02.$$

Относительные отклонения (ошибки) номинальных значений характеристик функционирования подсистемы - $\delta_{y_{i_0}}^H, \delta_{y_{i_0}}^B$:

$$\delta_{y_{i_0}}^H = (17,9 - 23,4) / 17,9 = -0,3$$

$$\delta_{y_{i_0}}^B = (24,1 - 23,4) / 24,1 = 0,029$$

Полученное значение функционала (-0,02) находится в вычисленном интервале, то есть рассматриваемые подсистемы будут подобны и в стохастическом смысле.

Таким образом, при функционировании реальной системы, в которой значения независимых параметров отличаются от их номинальных значений, но находятся в пределах относительных допусков изменения этих параметров, выходная характеристика также находится в пределах минимальных и максимальных ее значений.

Следовательно, рассмотренная методика позволяет определить зону допустимых значений выходного параметра подсистемы - E_K , в пределах которой можно задавать режимы ИГО, обеспечивающие требуемое качество обработки и корректировать длительность процесса с целью достижения его эффективности при обработке кож с различным содержанием микрокапилляров (от 10 до 40 %).

5.5.3. Математическая модель стохастического подобию функционирования подсистемы интенсифицированной гигротермической обработки кожевенно-обувных материалов – «фиксация»

1) Формируется функциональная зависимость по выходной характеристике подсистемы- $\Delta_{\text{ПОЛН}}$ (полной деформации кожи) от определяющих её параметров (табл. 5.8), которая имеет вид:

$$\Delta_{\text{ПОЛН}} = f(d, P_{\text{П}}, Q_{\text{П}}, C_K, \mu, \varphi_{\text{ПС}}, T_{\text{Н}}, T_{\text{К}}, \Delta P, P_{\text{Н}}, \rho, F_{\Phi}, \tau, V_K). \quad (5.35)$$

Таблица 5.8 – Условия однозначности подсистем: «объект технологии», «технология» при фиксации заготовок давлением

№	Параметры	Обозначение	Размерность	Рекомендуемые условия однозначности*
				Фиксация
Средства технологии				
1	Объём камеры	V_K	м ³	9·10 ⁻²
2	Влажность паровоздушной среды	ФП.С.	%	97
Технология				
3	Время	τ	с	360
4	Температура начальная	T _Н	К	323
5	Температура конечная	T _К	К	331
6	Начальное давление в камере	P _Н	Па	20·10 ³
7	Перепад давлений	ΔP	Па	16,5·10 ³
8	Усилие формования	F _Ф	Н	577,5
9	Приформовочное давление	P _П	Па	0,2 ·10 ⁶
Объект, Продукция				
10	Масса образца	m _з	кг	2,0·10 ⁻³
11	Толщина кожи хромового дубления	d	м	1,6·10 ⁻³
12	Объём микрокапилляров	V _{М.К.}	м ³	0,257·10 ⁻³
13	Паропроницаемость	Q _П	кг/ (м ² ·с)	107,73·10 ³
14	Удельная теплоёмкость кожи	C _К	Дж/(кг·К)	
15	Коэффициент диффузионного сопротивления: – с бахтармянной стороны; – с лицевой стороны	μ		3,2 5,35
16	Полная деформация	Δ _{ПОЛН}	%	50
* рекомендуемые режимы приняты на основе апробированных экспериментальных и теоретических исследований процесса фиксации с использованием вакуума и давления в данной работе.				

2) Для формирования частных критериев подобия функционирования подсистем используем программу расчёта критериев (KriNN), разработанную на кафедре «Машины и оборудование бытового и жилищно-коммунального назначения» ИСОиП (филиала) ДГТУ.

При этом в качестве независимых параметров принимаются: начальная температура – T_H , начальное давление в камере – P_H , время воздействия – τ , плотность паровоздушной среды – ρ .

Полученные выражения для частных критериев подобия имеют вид:

$$\begin{aligned}
 \pi(\varphi_{\text{ПС}}) &= \varphi_{\text{ПС}} / (\tau^0 \cdot T_{\text{Н}}^0 \cdot Q_{\text{П}}^0 \cdot C_{\text{К}}^0) = 0,97 \\
 \pi(T_{\text{К}}) &= T_{\text{К}} / (\tau^0 \cdot T_{\text{Н}}^1 \cdot Q_{\text{П}}^0 \cdot C_{\text{К}}^0) = 1,02 \\
 \pi(\Delta P) &= \Delta P / (\tau^0 \cdot T_{\text{Н}}^{0,5} \cdot Q_{\text{П}}^1 \cdot C_{\text{К}}^{0,5}) = 2,12 \cdot 10^{-4} \\
 \pi(d) &= d / (\tau^1 \cdot T_{\text{Н}}^{0,5} \cdot Q_{\text{П}}^0 \cdot C_{\text{К}}^{0,5}) = 9,05 \cdot 10^{-9} \\
 \pi(F_{\Phi}) &= F_{\Phi} / (\tau^2 \cdot T_{\text{Н}}^{1,5} \cdot Q_{\text{П}}^1 \cdot C_{\text{К}}^{1,5}) = 1,1 \cdot 10^{-16} \\
 \pi(V_{\text{К}}) &= V_{\text{К}} / (\tau^3 \cdot T_{\text{Н}}^{1,5} \cdot Q_{\text{П}}^0 \cdot C_{\text{К}}^{1,5}) = 5,14 \cdot 10^{-18} \\
 \pi(P_{\text{П}}) &= P_{\text{П}} / (\tau^0 \cdot T_{\text{Н}}^{0,5} \cdot Q_{\text{П}}^1 \cdot C_{\text{К}}^{0,5}) = 2,57 \cdot 10^{-3} \\
 \pi(\mu) &= \mu / (\tau^0 \cdot T_{\text{Н}}^0 \cdot Q_{\text{П}}^0 \cdot C_{\text{К}}^0) = 3,2 \\
 \pi(\rho) &= \rho / (\tau^0 \cdot T_{\text{Н}}^{-0,5} \cdot Q_{\text{П}}^1 \cdot C_{\text{К}}^{-0,5}) = 1,74 \cdot 10^{-3} \\
 \pi(P_{\text{Н}}) &= P_{\text{Н}} / (\tau^0 \cdot T_{\text{Н}}^{0,5} \cdot Q_{\text{П}}^1 \cdot C_{\text{К}}^{0,5}) = 2,57 \cdot 10^{-4} \\
 \pi(\Delta_{\text{ПОЛН.}}) &= \Delta_{\text{ПОЛН.}} / (\tau^0 \cdot T_{\text{Н}}^0 \cdot Q_{\text{П}}^0 \cdot C_{\text{К}}^0) = 20 \\
 \pi(C_{\text{ПО}}) &= C_{\text{ПО}} / (\tau^0 \cdot T_{\text{Н}}^0 \cdot Q_{\text{П}}^0 \cdot C_{\text{К}}^1) = 1,189 \\
 \pi(Q_{\text{П}}) &= Q_{\text{П}} / (\tau^0 \cdot T_{\text{Н}}^0 \cdot \rho^{0,5} \cdot P_{\text{Н}}^{0,5}) = 149 \\
 \pi(C_{\text{К}}) &= C_{\text{К}} / (\tau^0 \cdot T_{\text{Н}}^{-1} \cdot \rho^1 \cdot P_{\text{Н}}^1) = 6,76
 \end{aligned} \tag{5.36}$$

3) Объединяя полученные частные критерии $\pi_{Q_{\text{П}}}$, $\pi_{C_{\text{К}}}$, π_F , π_d , $\pi_{\Delta_{\text{ПОЛН}}}$ по физической значимости, путём последовательного деления одного частного π – критерия на последующий, получили $\pi_{\text{КФ}}$ - критерий подобия, характеризующий физико-механические свойства обрабатываемого материала при фиксации (критерий эффективности).

$$\pi_{\text{КФ}} = \frac{d}{F_{\Phi}} \cdot \frac{1}{c_{\text{К}} \cdot Q_{\text{П}}} \cdot \frac{P_{\text{Н}}^3 \cdot \tau \cdot \rho^3}{T_{\text{Н}} \cdot \Delta_{\text{ПОЛН}}} \tag{5.37}$$

4) Численное значение объединённого критерия $\pi_{\text{КФ}}$ после подстановки номинальных значений независимых параметров: $P_{\text{Н}} = 20 \cdot 10^3$ Па; $T_{\text{Н}} = 323$ °К; $\tau = 360$ с; $\rho = 0,25$ кг/м³ в уравнение 5.34 составило:

$$\pi_{\text{КФ}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot (20 \cdot 10^3)^3 \cdot 360 \cdot 0,25^3}{28 \cdot 108 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^3 \cdot 3,2 \cdot 323} = 80 \cdot 10^{-4}$$

5) Выразим из уравнения 5.34 значение выходной характеристики $\Delta_{\text{ПОЛН}}$ и введя коэффициент условной микрокапиллярной пористости Π , отнесённый к отношению $\frac{d}{m_3}$, получим:

$$\Delta_{\text{ПОЛН}} = \frac{d}{F_{\Phi}} \cdot \frac{1}{c_{\text{К}} \cdot Q_{\text{П}}} \cdot \Pi \cdot \frac{P_{\text{Н}}^3 \cdot \tau \cdot \rho^3}{T_{\text{Н}} \cdot \pi_{\text{КФ}}} \tag{5.38}$$

6) Граничные значения выходной характеристики функционирования подсистемы «фиксация» и независимых параметров установлены на основе экспериментальных исследований, выполненных в четвёртой главе:

$$\left. \begin{aligned} 28 \leq \Delta \kappa \leq 50; \\ 0,02 \cdot 10^6 \leq P \leq 0,05 \cdot 10^6; \\ 323 \leq T \leq 333; \\ 120 \leq \tau \leq 360; \\ 0,16 \leq \rho \leq 0,26 \end{aligned} \right\} \quad (5.39)$$

7) После разложения в ряд Тейлора уравнения (5.38) получено выражение для выходной характеристики подсистемы в стохастическом смысле:

$$\Delta_{\kappa i} = \Delta_{\kappa} + \frac{A}{\pi_{\kappa \phi}} \cdot \Pi \cdot \left[\frac{\partial f}{\partial P} \cdot (P_{cp} - P_i) + \frac{\partial f}{\partial T} \cdot (T_{cp} - T_i) + \frac{\partial f}{\partial \tau} \cdot (\tau_{cp} - \tau_i) + \frac{\partial f}{\partial \rho} \cdot (\rho_{cp} - \rho_i) \right], \quad (5.40)$$

где $A = \frac{d}{F_0} \cdot \frac{1}{c_k \cdot Q_n}$ – коэффициент связи параметров, характеризующих физико-механические свойства кожи;

$$f = \frac{P_H^3 \cdot \tau \cdot \rho^3}{T_H} \text{ – функция связи по независимым параметрам;}$$

Значения частных производных функции связи $f = \frac{P_H^3 \cdot \tau \cdot \rho^3}{T_H}$ по независимым параметрам вычислены при подстановке в них их номинальных значений: $P = 20 \cdot 10^3$ Па; $T = 323$ °К; $\tau = 360$ с; $\rho = 0,25$ кг/м³:

$$\frac{\partial f}{\partial T} = 1,59 \cdot 10^7, \quad \frac{\partial f}{\partial P} = 1,03 \cdot 10^6, \quad \frac{\partial f}{\partial \tau} = 4,28 \cdot 10^7, \quad \frac{\partial f}{\partial \rho} = 9,63 \cdot 10^6$$

Для нахождения средних значений параметров P_{cp} , T_{cp} , τ_{cp} , ρ_{cp} при фиксации использованы экспериментальные данные, полученные в главе 4 и приведёнными в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Экспериментальные значения параметров процесса фиксации с применением вакуума и давления

Обозначение параметров	Размерность	Средние значения параметров				
S_j (время - τ)	с	120	180	240	300	360
X_j (давление - P)	Па	$25 \cdot 10^3$	$27 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	$40 \cdot 10^3$
Z_j (температура - T)	К	323	325	327	329	331
R_j (плотность - ρ)	кг/м ³	$16 \cdot 10^{-2}$	$17 \cdot 10^{-2}$	$19 \cdot 10^{-2}$	$22 \cdot 10^{-2}$	$26 \cdot 10^{-2}$

8) В связи с тем, что при формировании существенное значение имеет толщина образца, а величина полной деформации $\Delta_{\text{полн}}$ нормирована и составляет 40 % [45] при стандартной нагрузке 200 Н, то, как следует из приведённых графических зависимостей (рис. 5.9–5.12), такая деформация обеспечивается для каждой кожи за различное время и проверка на стохастическое подобие должна производиться для каждой кожи отдельно.

Строим графические зависимости для принятого интервала времени с учётом стохастического строения кожи, варьируя долей микрокапиллярной пористости кож хромового дубления от 0,1 до 0,4 общей пористости, условно определяемой в работе, как отношение толщины образца (d) к его массе (m).

9) Проведя на полученных графиках прямые, соответствующие верхней и нижней границам значений выходной характеристики, определяем интервал времени, соответствующий гарантированному гигротермическому воздействию при фиксации кожевенно-обувных материалов с учётом их стохастического строения (микрокапиллярной пористости).

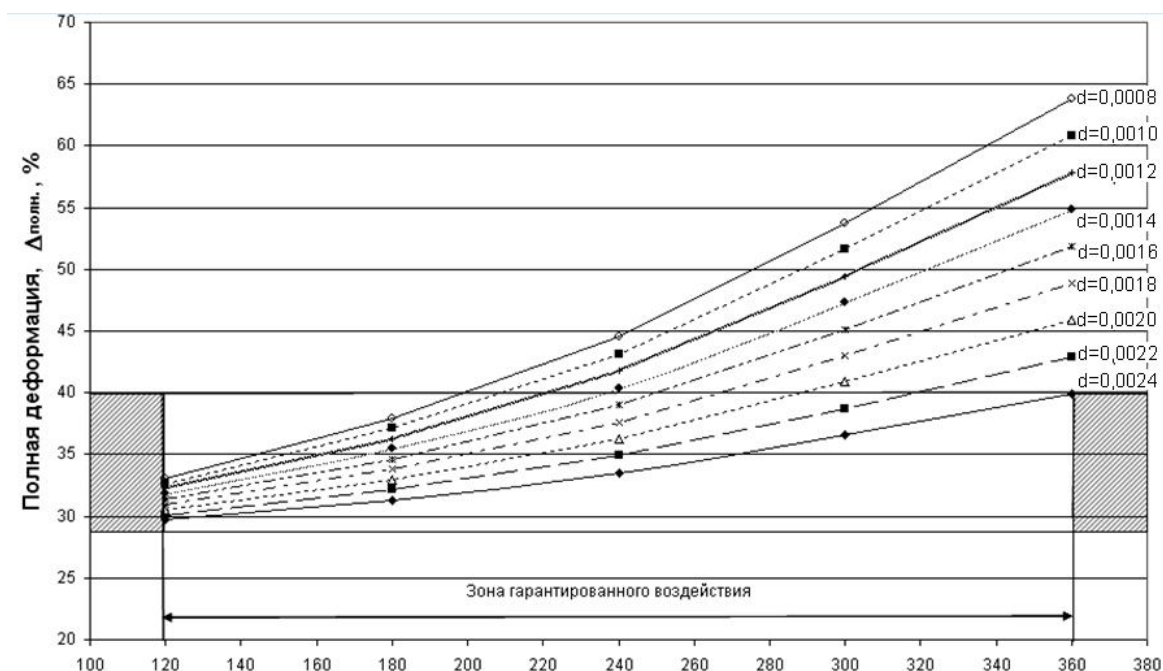


Рис. 5.9. Изменения полной деформации кож хромового дубления $\Delta_{\text{полн}}$ различной толщины d от времени при фиксации с гарантированным воздействием на кожи толщиной $d=0,0024$ мм (условная микрокапиллярная пористость $P=0,1$, усилие $F=200$ Н)

10) Для установления подобия подсистем и в стохастическом смысле при обработке кожи толщиной 0,024 в течение минимально возможного времени, равного 120 с (рис. 5.9) и, соответствующим ему значений: давления $P = 25 \cdot 10^3$ Па; температуры $T = 323$ °K; $\rho = 0,16$ кг/м³ находятся численные значения ошибок независимых параметров:

$$\delta_{X_j} = \frac{X_j - X_{j_0}}{X_j} = \Delta_p = (25-10)/25=0,2$$

$$\delta_{Z_j} = \frac{Z_j - Z_{j_0}}{Z_j} = \Delta_T = (323-323)/323=0$$

$$\delta_{S_j} = \frac{S_j - S_{j_0}}{S_j} = \Delta_t = (120-120)/120=0$$

$$\delta_{R_j} = \frac{R_j - R_{j_0}}{R_j} = \Delta_p = (0,16-0,26)/0,16=-0,06$$

Численное значение функционала составит: $3 \cdot 0,2 - 3 \cdot 0,06 = 0,40$.

Относительные отклонения (ошибки) номинальных значений характеристик функционирования подсистемы - $\delta_{y_{i_0}}^H, \delta_{y_{i_0}}^B$:

$$\delta_{y_{i_0}}^H = (28-30)/28 = -0,1$$

$$\delta_{y_{i_0}}^B = (50-30)/50 = 0,4$$

Полученное значение функционала (0,4) находится в вычисленном интервале, то есть рассматриваемые подсистемы будут подобны и в стохастическом смысле.

Следовательно, рассмотренная методика позволяет определить зону допустимых значений выходного параметра подсистемы - $\Delta_{\text{полн}}$, в пределах которой можно задавать режимы ИГО, обеспечивающие требуемое качество обработки и корректировать длительность процесса с целью достижения его эффективности при обработке кож с возможным различным содержанием микрокапилляров (от 10 до 40 %).

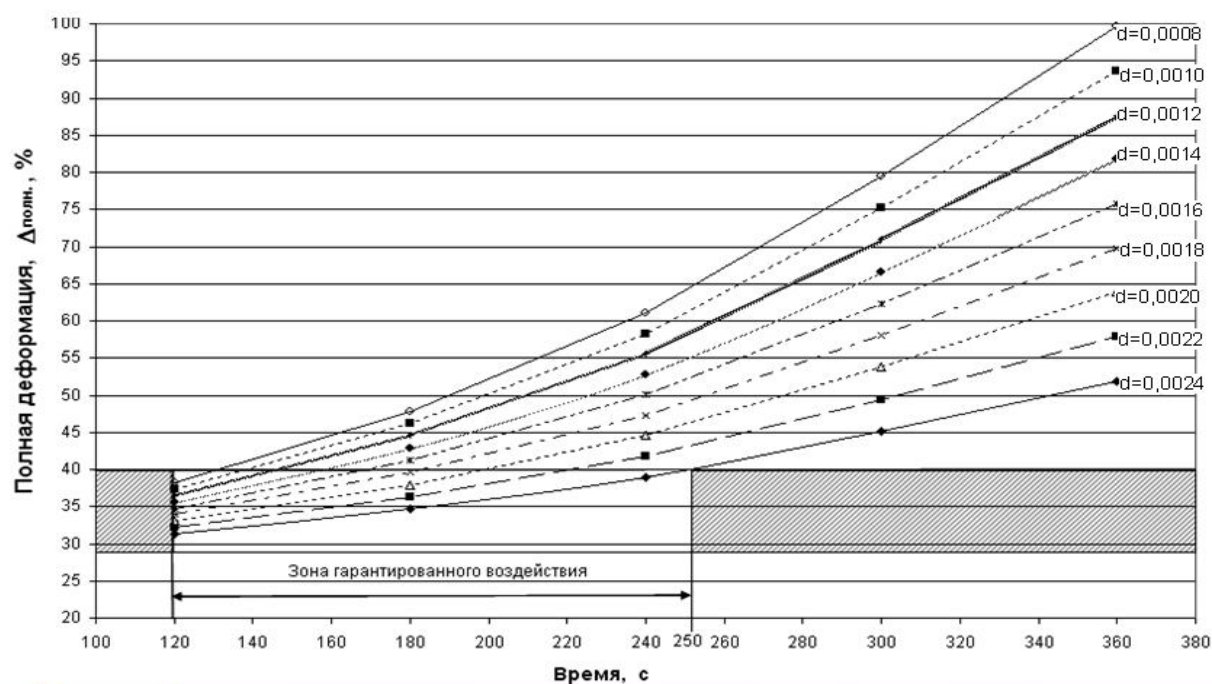


Рис. 5.10. Изменения полной деформации кож хромового дубления $\Delta_{\text{полн.}}$ различной толщины d от времени при фиксации сгарантированным воздействием на кожи толщиной $d=0,0024$ мм (условная микрокапиллярная пористость $\Pi=0,2$, усилие $F=200$ Н)

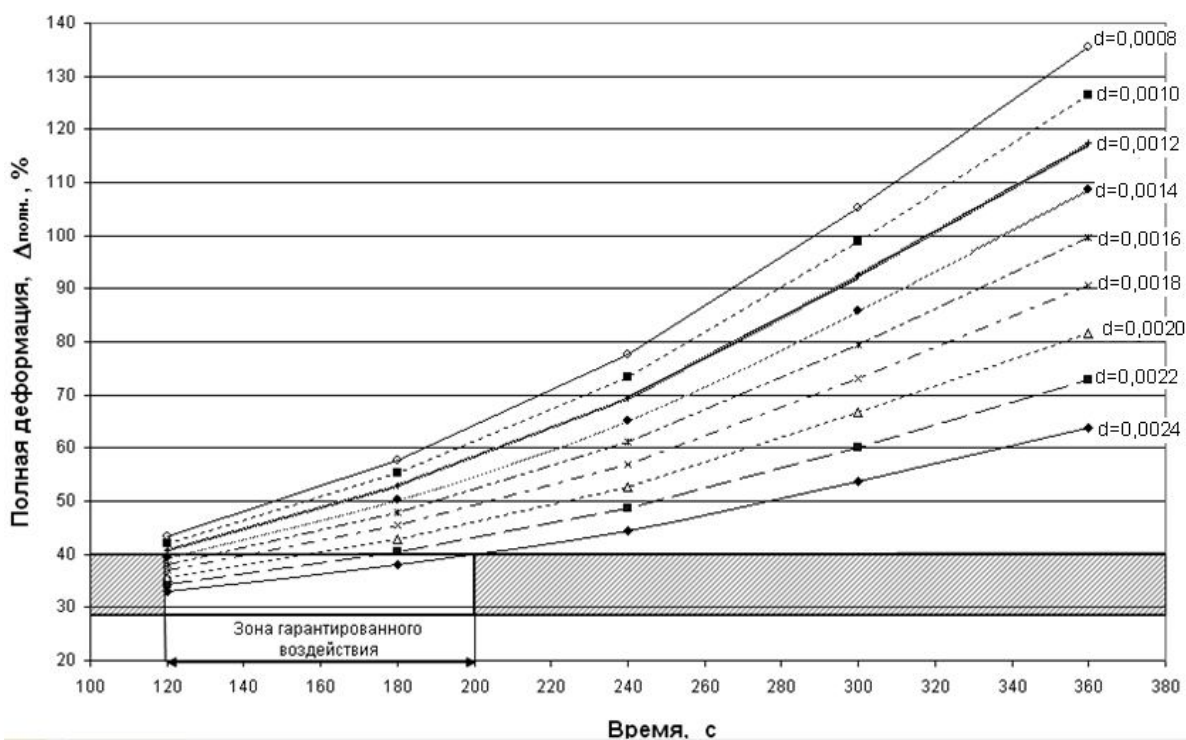


Рис. 5.11. Изменения полной деформации кож хромового дубления $\Delta_{\text{полн.}}$ различной толщины d от времени при фиксации сгарантированным воздействием на кожи толщиной $d=0,0024$ мм (условная микрокапиллярная пористость $\Pi=0,3$, усилие $F=200$ Н)

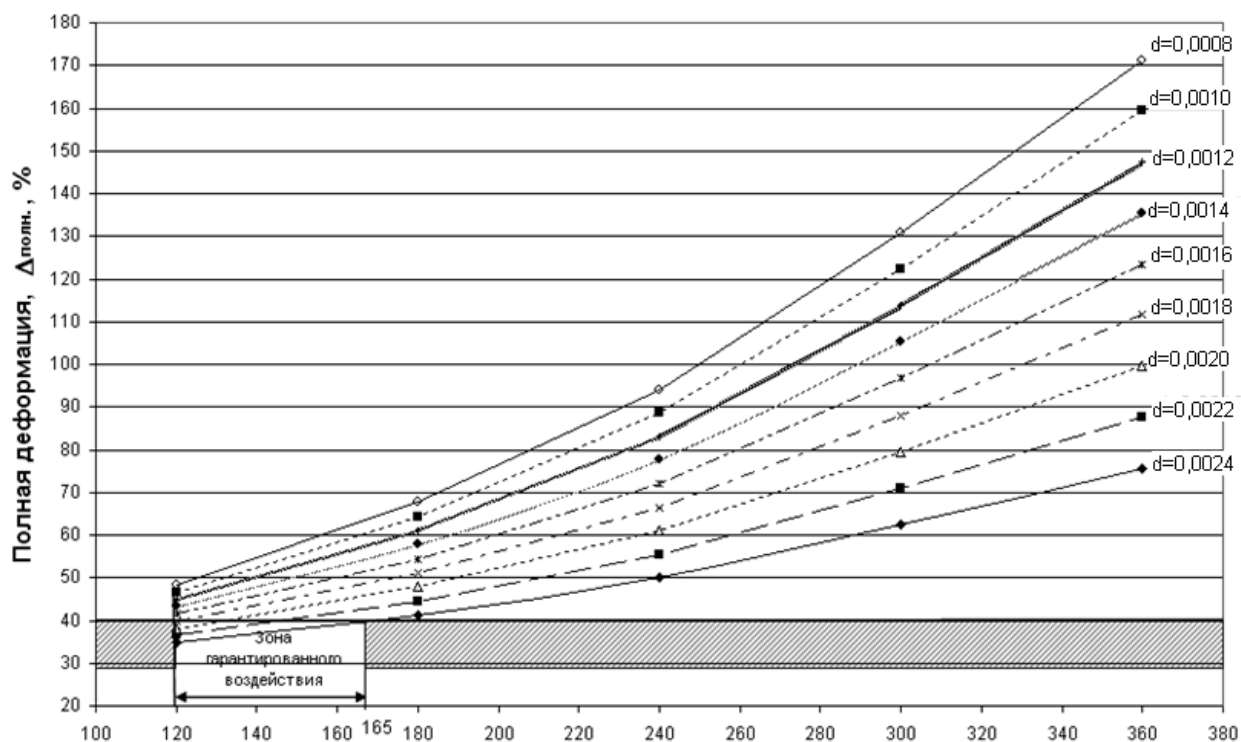


Рис. 5.12. Изменения полной деформации кож хромого дубления $\Delta_{полн.}$ различной толщины d от времени при фиксации сгарантированным воздействием на кожи толщиной $d=0,0024$ мм
(условная микрокапиллярная пористость $\Pi=0,4$, усилие $F=200$ Н)

5.5.4. Математическая модель стохастического подоби́я функционирования подсистемы интенсифицированной гигротермической обработки коженно-обувных материалов – «сушка»

1) Формируется функциональная зависимость по выходной характеристике подсистемы- Δ_k (конечной деформации кожи) от определяющих её параметров (табл. 5.9), которая имеет вид:

$$\Delta_k = f(d, m_3, V_{м.к.}, Q_{п.}, C_k, \mu, \varphi_{п.с.}, T_n, T_k, P_n, P_k, \tau, Q_t, V_k, D, \rho, C_{по}, R_{по}). \quad (5.41)$$

2) Для формирования частных критериев подоби́я функционирования подсистем используем программу расчёта критериев ($K_{rin} N*N$), разработанную на кафедре «Машины и оборудование бытового и жилищно-коммунального назначения» ИСОиП (филиала) ДГТУ.

Таблица 5.10 – Условия однозначности подсистем: «объект технологии», «технология» при сушке

№	Параметры	Обозначение	Размерность	Рекомендуемые условия однозначности*
				Сушка
Средства технологии				
1	Объём камеры	V_K	м^3	$9 \cdot 10^{-2}$
2	Коэффициент диффузии пара	D	$\text{м}^2/\text{с}$	$-0.51 \cdot 10^{-4}$
3	Плотность пара в условиях вакуума	ρ	$\text{кг}/\text{м}^3$	$24 \cdot 10^{-2}$
4	Удельная теплоёмкость воды	C_B	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$1,925 \cdot 10^3$
5	Удельная теплоёмкость пара	$C_{\text{ПО}}$	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$2,018 \cdot 10^3$
6	Удельная теплота парообразования	$R_{\text{ПО}}$	$\text{Дж}/(\text{кг})$	$480 \cdot 10^3$
7	Влажность паровоздушной среды	$\varphi_{\text{п.с.}}$	%	55
8	Количество теплоты	Q_T	Дж	2050
Технология				
9	Время	τ	с	360
10	Температура начальная	T_H	К	338
11	Температура конечная	T_K	К	348
12	Начальное давление в камере	P_H	Па	$20 \cdot 10^3$
13	Конечное давление в камере	P_K	Па	$50 \cdot 10^3$
14	Коэффициент цикличности	K		3
15	Интенсивность	I	$\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$	$3,2 \cdot 10^{-23}$
Объект, Продукция				
19	Масса заготовок	m_z	кг	$2,0 \cdot 10^{-3}$
20	Толщина кожи хромового дубления	d	м	$1,6 \cdot 10^{-3}$
21	Объём микрокапилляров	$V_{\text{м.к.}}$	м^3	$0,257 \cdot 10^{-3}$
22	Паропроницаемость	$Q_{\text{П}}$	$\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$107,73 \cdot 10^3$
23	Удельная теплоёмкость кожи	C_K	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$1,61 \cdot 10^3$
24	Коэффициент диффузионного сопротивления: – с бахтармянной стороны; – с лицевой стороны	μ		3,2 5,35
25	Конечный модуль упругости	E_K	Па	$30 \cdot 10^6$
26	Конечная деформация	Δ_K	м/м	19
27	Конечный предел прочности при растяжении	δ_{PK}	Па	$18 \cdot 10^6$
* рекомендуемые режимы приняты на основе апробированных экспериментальных и теоретических исследований процесса вакуумированной сушки в данной работе.				

При этом в качестве независимых параметров принимаются: начальная температура – T_H , начальное давление в камере – P_H , время воздействия – τ , плотность паровоздушной среды – ρ .

Полученные выражения для частных критериев подобия имеют вид:

$$\begin{aligned}
 \pi(d) &= d / (T_H^0 \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^1 \cdot \rho^{-0,5}) = 9,62 \cdot 10^{-9} \\
 \pi(m_3) &= m_3 / (T_H^0 \cdot P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-0,5}) = 2,41 \cdot 10^{-17} \\
 \pi(V_{МК}) &= V_{МК} / (T_H^0 \cdot P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}) = 2,28 \cdot 10^{-19} \\
 \pi(E_K) &= E_K / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 1500 \\
 \pi(\delta_{PK}) &= \delta_{PK} / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 900 \\
 \pi(\Delta_K) &= \Delta_K / (T_H^0 \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^1 \cdot \rho^{-0,5}) = 1,82 \cdot 10^{-4} \\
 \pi(Q_{\Pi}) &= Q_{\Pi} / (T_H^0 \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^0 \cdot \rho^{0,5}) = 1554,94 \\
 \pi(C_K) &= C_K / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 6,53 \\
 \pi(\mu) &= \mu / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 3,2 \\
 \pi(\varphi_{ПС}) &= \varphi_{ПС} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 0,55 \\
 \pi(T_K) &= T_K / (T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 1,02 \\
 \pi(P_K) &= P_K / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 2 \\
 \pi(D) &= D / (T_H^0 \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^{-1} \cdot \rho^{-0,5}) = 6,36 \cdot 10^{-5} \\
 \pi(C_B) &= C_B / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 7,8 \\
 \pi(R_{ПО}) &= R_{ПО} / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 1946,88 \\
 \pi(C_{ПО}) &= C_{ПО} / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 0,02 \\
 \pi(V_K) &= V_K / (T_H^0 \cdot P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}) = 8,01 \cdot 10^{-17} \\
 \pi(Q_T) &= Q_T / (T_H^0 \cdot P_H^{2,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}) = 9,13 \cdot 10^{-17} \\
 \pi(I) &= I / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^{-1} \cdot \rho^{-1}) = 4,95 \cdot 10^{-20} \\
 \pi(K) &= K / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 3
 \end{aligned} \tag{5.42}$$

3) Объединяя полученные частные критерии $\pi_{Q_{\Pi}}$, π_{C_K} , π_{μ} , π_d , π_{m_3} , π_{Δ_K} по физической значимости путём последовательного деления одного частного π – критерия на последующий, получили π_{Kc} – критерия подобия характеризующий физико-механические свойства обрабатываемого материала при сушке (критерий эффективности):

$$\pi_{Kc} = \frac{d}{m_3 \cdot \Delta_K \cdot C_K \cdot Q_{\Pi} \cdot \mu} \cdot \frac{P_H^3 \cdot \tau \cdot \rho}{T_H} \tag{5.43}$$

4) Численное значение объединённого критерия π_{Kc} после подстановки номинальных значений независимых параметров: $P_H = 20 \cdot 10^3$ Па;

$T_H = 338$ °K; $\tau = 360$ с; $\rho = 0,24$ кг/м³ в уравнение 5.39 составило:

$$\pi_{\text{Кс}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot (20 \cdot 10^3)^3 \cdot 360 \cdot 24 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 19 \cdot 108 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^3 \cdot 3,2 \cdot 338} = 70,4$$

5) Выразим из уравнения (5.43) значение выходной характеристики $\Delta_{\text{К}}$ и введя коэффициент условной капиллярной пористости Π , отнесённый к отношению $\frac{d}{m_3}$, получим:

$$\Delta_{\text{К}} = \frac{d}{m_3 \cdot \pi_{\text{Кс}} \cdot C_{\text{К}} \cdot Q_{\Pi} \cdot \mu} \cdot \frac{P_{\text{H}}^3 \cdot \tau \cdot \rho}{T_{\text{H}}} \quad (5.44)$$

6) Граничные значения выходной характеристики функционирования подсистемы «сушка» и независимых параметров установлены на основании экспериментальных исследований, выполненных в четвёртой главе:

$$\left. \begin{aligned} 18 \leq \Delta_{\text{Е}} \leq 24; \\ 0,02 \cdot 10^6 \leq P \leq 0,05 \cdot 10^6; \\ 338 \leq T \leq 348; \\ 120 \leq \tau \leq 360, \\ 0,16 \leq \rho \leq 0,26 \end{aligned} \right\} \quad (5.45)$$

7) После разложения в ряд Тейлора уравнения (5.44) получено выражение для выходной характеристики подсистемы в стохастическом смысле:

$$\Delta_{\text{Ки}} = \Delta_{\text{К}} + \frac{A}{\pi_{\text{Кс}}} \cdot \Pi \cdot \left[\frac{df}{dP} \cdot (P_{\text{ср}} - P_i) + \frac{df}{dT} \cdot (T_{\text{ср}} - T_i) + \frac{df}{d\tau} \cdot (\tau_{\text{ср}} - \tau_i) + \frac{df}{d\rho} \cdot (\rho_{\text{ср}} - \rho_i) \right], \quad (5.46)$$

где $A = \frac{d}{m} \cdot \frac{1}{C_{\text{К}} \cdot Q_{\Pi} \cdot \mu}$ – коэффициент связи параметров, характеризующих физи-

ко-механические свойства кожи;

$f = \frac{P_{\text{H}}^3 \cdot \tau \cdot \rho}{T_{\text{H}}}$ – функция связи по независимым параметрам;

Значения частных производных функции связи - $f = \frac{P_i^3 \cdot \tau \cdot \rho}{\dot{O}_i}$, вычис-

лены при подстановке в них их номинальных значений: независимых параметров: $P = 20 \cdot 10^3$ Па; $T = 338$ °К; $\tau = 360$ с; $\rho = 0,25$ кг/м³:

$$\frac{\partial f}{\partial P} = 3,2 \cdot 10^8, \quad \frac{\partial f}{\partial T} = -6,3 \cdot 10^9, \quad \frac{\partial f}{\partial \tau} = 3,2 \cdot 10^8, \quad \frac{\partial f}{\partial \rho} = 8,52 \cdot 10^{12}, \quad .$$

Для нахождения средних значений параметров сушки P_{cp} , T_{cp} , τ_{cp} , ρ_{cp} использованы экспериментальные данные, полученными в главе 4 и приведённые в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Экспериментальные значения параметров процесса сушки с применением вакуума

Обозначение параметров	Размерность	Средние значения параметров						
S_j (время - τ)	с	120	180	240	300	360	420	480
X_j (давление - P)	Па	$25 \cdot 10^3$	$27 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	$40 \cdot 10^3$	$42 \cdot 10^3$	$45 \cdot 10^3$
Z_j (температура - T)	К	340	342	345	347	348	349	350
R_j (плотность - ρ)	кг/м ³	$15 \cdot 10^{-2}$	$17 \cdot 10^{-2}$	$18 \cdot 10^{-2}$	$23 \cdot 10^{-2}$	$25 \cdot 10^{-2}$	$30 \cdot 10^{-2}$	$35 \cdot 10^{-2}$

8) Строятся графические зависимости для принятого интервала времени с учётом стохастического строения кожи, варьируя долей микрокапиллярной пористости кож хромового дубления от 0,1 до 0,4 общей пористости, условно определяемой в работе, как отношение толщины образца (d) к его массе (m) для различных способов подвода пара: с бахтармянной стороны (рис. 5.13) и с лицевой (рис. 5.14).

9) Проведя на полученных графиках прямые, соответствующие верхней и нижней границам значений выходной характеристики Δ_k , определяем интервал времени, соответствующий гарантированному гигротермическому воздействию при сушке кожевенно-обувных материалов с учётом их стохастического строения (микрокапиллярной пористости).

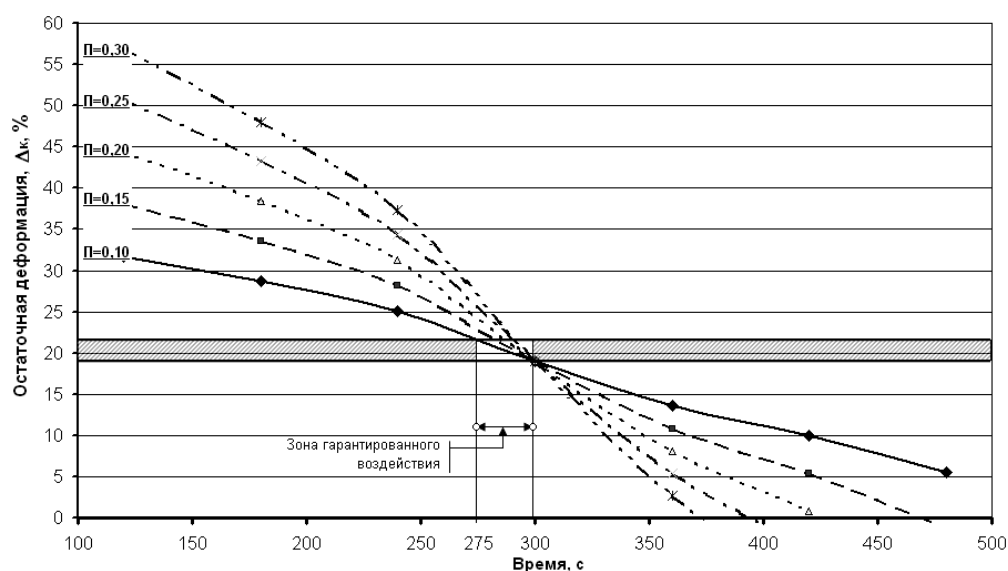


Рис. 5.13. Изменения остаточной деформации кож хромового дубления Δ_k от времени вакуумной сушки при подаче пара с лицевой стороны ($\mu=7,5$)

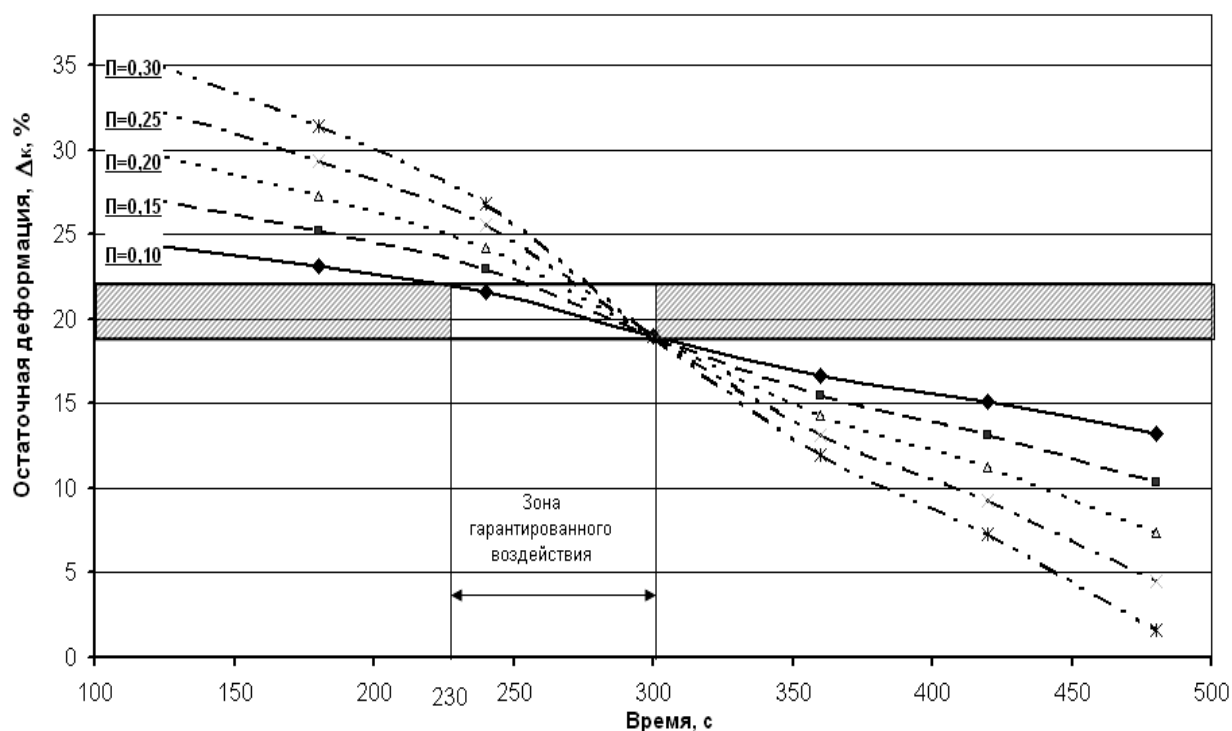


Рис. 5.14. Изменения остаточной деформации кож хромового дубления Δ_k от времени вакуумной сушки при подаче пара с бахтармянной стороны ($\mu=3,2$)

10) Для установления подобию подсистем и в стохастическом смысле при обработке в течение минимально возможного времени, равного 275 с (рис. 5.13) и соответствующим ему значениям: давления $P = 34 \cdot 10^3$ Па; тем-

пературы $T = 346 \text{ }^0\text{K}$; $\rho = 0,21 \text{ кг/м}^3$ находятся численные значения ошибок независимых параметров:

$$\delta_{X_j} = \frac{X_j - X_{j_0}}{X_j} = \Delta_p = (34-20)/34=0,05$$

$$\delta_{Z_j} = \frac{Z_j - Z_{j_0}}{Z_j} = \Delta_T = (346-338)/346=0,02$$

$$\delta_{S_j} = \frac{S_j - S_{j_0}}{S_j} = \Delta_\tau = (275-360)/275=-0,3$$

$$\delta_{R_j} = \frac{R_j - R_{j_0}}{R_j} = \Delta_p = (0,21-0,25)/0,21=-0,19$$

Численное значение функционала составит: $3*0,05+0,02-0,3-0,19=-0,32$.

Относительные отклонения (ошибки) номинальных значений характеристик функционирования подсистемы – $\delta_{y_{i_0}}^H, \delta_{y_{i_0}}^B$:

$$\delta_{y_{i_0}}^H = (18-24)/18=-0,33$$

$$\delta_{y_{i_0}}^B = (22-24)/22=-0,08$$

Полученное значение функционала (-0,32) находится в вычисленном интервале, то есть рассматриваемые подсистемы будут подобны и в стохастическом смысле. Следовательно, рассмотренная методика позволяет определить зону допустимых значений выходного параметра подсистемы - Δ_K , в пределах которой можно задавать режимы ИГО, обеспечивающие требуемое качество обработки и корректировать длительность процесса с целью достижения его эффективности при обработке кож с возможным различным содержанием микрокапилляров (от 10 до 40 %).

5.5.5. Математическая модель стохастического подоби́я функцио- нирования подсистемы интенсифицированной гигротермической обра- ботки кожевенно-обувных материалов – «влажно-тепловая обработка

1) Формируется функциональная зависимость по выходной характери-
стике подсистемы - Δ_k (конечной деформации кожи) от определяющих её па-
раметров (табл. 5.12), которая имеет вид:

$$\Delta_k = f(d, m_3, V_{\text{м.к}}, Q_{\text{п}}, C_{\text{к}}, \mu, \varphi_{\text{п.с}}, T_{\text{н}}, T_{\text{к}}, P_{\text{н}}, P_{\text{к}}, \tau, Q_{\text{т}}, V_{\text{к}}, D, \rho, C_{\text{по}}, R_{\text{по}}). \quad (5.47)$$

Для формирования частных критериев подоби́я функционирования
подсистем используем программу расчёта критериев (Krin N*N).

Таблица 5.12 – Условия однозначности подсистем: «объект технологии»,
«технология» при влажно-тепловой обработке

№	Параметры	Обозна- чение	Размерность	Рекомендуемые условия однозначности*
				ВТО
1	2	3	4	5
Средства технологии				
1	Объём камеры	$V_{\text{к}}$	м^3	$9 \cdot 10^{-2}$
2	Коэффициент диффузии пара	D	$\text{м}^2/\text{с}$	$0,78 \cdot 10^{-4}$
3	Плотность пара в условиях вакуума	ρ	$\text{кг}/\text{м}^3$	$25 \cdot 10^{-2}$
4	Удельная теплоёмкость воды	$C_{\text{в}}$	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$1,915 \cdot 10^3$
5	Удельная теплоёмкость пара	$C_{\text{по}}$	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$2,018 \cdot 10^3$
6	Удельная теплота парообразования	$R_{\text{по}}$	$\text{Дж}/(\text{кг})$	$480 \cdot 10^3$
7	Влажность паровоздушной среды	$\varphi_{\text{п.с.}}$	%	97
8	Количество теплоты	$Q_{\text{т}}$	Дж	2050
Технология				
9	Время	τ	с	120
10	Температура начальная	$T_{\text{н}}$	К	330
11	Температура конечная	$T_{\text{к}}$	К	340
12	Начальное давление в камере	$P_{\text{н}}$	Па	$24 \cdot 10^3$
13	Конечное давление в камере	$P_{\text{к}}$	Па	$40 \cdot 10^3$
14	Интенсивность	I	$\text{кз}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$	$6,2 \cdot 10^{-20}$
Объект, Продукция				
15	Масса образца	m_3	кг	$2,0 \cdot 10^{-3}$
16	Толщина кожи хромового дубления	d	м	$1,6 \cdot 10^{-3}$
17	Объём микрокапилляров	$V_{\text{м.к.}}$	м^3	$0,257 \cdot 10^{-3}$
18	Паропроницаемость	$Q_{\text{п}}$	$\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$107,73 \cdot 10^3$

Оконч. таблицы 5.12

1	2	3	4	5
19	Удельная теплоёмкость кожи	C_K	Дж/(кг·К)	$1,61 \cdot 10^3$
20	Коэффициент диффузионного сопротивления: – с бахтармянной стороны; – с лицевой стороны	μ		3,2 5,35
21	Конечный модуль упругости	E_K	Па	$27 \cdot 10^6$
22	Остаточная деформация	Δ_K	м/м	21
23	Предел прочности при растяжении	δ_P	Па	$17 \cdot 10^6$
* рекомендуемые режимы приняты на основе апробированных экспериментальных и теоретических исследований процессов при влажно-тепловой обработке в данной работе с использованием вакуума.				

При этом в качестве независимых параметров принимаются: начальная температура – T_H , начальное давление в камере – P_H , время воздействия – τ , плотность паровоздушной среды – ρ .

Полученные выражения для частных критериев подобия имеют вид:

$$\begin{aligned}
 \pi(d) &= d / (T_H^0 \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^1 \cdot \rho^{-0,5}) = 2.94 \cdot 10^{-8} \\
 \pi(m_3) &= m_3 / (T_H^0 \cdot P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-0,5}) = 6.64 \cdot 10^{-176} \\
 \pi(V_{MK}) &= V_{MK} / (T_H^0 \cdot P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}) = 6.57 \cdot 10^{-18} \\
 \pi(E_K) &= E_K / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 1350 \\
 \pi(\Delta_K) &= \Delta_K / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 21 \\
 \pi(\delta_{PK}) &= \delta_{PK} / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 850 \\
 \pi(Q_{II}) &= Q_{II} / (T_H^0 \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^0 \cdot \rho^{0,5}) = 1523.53 \\
 \pi(C_K) &= C_K / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 6,64 \\
 \pi(\mu) &= \mu / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 3,2 \\
 \pi(\varphi_{ПС}) &= \varphi_{ПС} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 0,97 \\
 \pi(T_K) &= T_K / (T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 1,03 \\
 \pi(P_K) &= P_K / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 2 \\
 \pi(D) &= D / (T_H^0 \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^{-1} \cdot \rho^{-0,5}) = 3.3 \cdot 10^{-5} \\
 \pi(C_B) &= C_B / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 7.89 \\
 \pi(R_{ПО}) &= R_{ПО} / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 1980 \\
 \pi(C_{ПО}) &= C_{ПО} / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 29.77 \\
 \pi(V_K) &= V_K / (T_H^0 \cdot P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}) = 2.3 \cdot 10^{-15} \\
 \pi(Q_T) &= Q_T / (T_H^0 \cdot P_H^{2,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}) = 2.62 \cdot 10^{-16} \\
 \pi(I) &= I / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^{-1} \cdot \rho^{-1}) = 2.97 \cdot 10^{-21}
 \end{aligned} \tag{5.48}$$

3) Объединяя полученные частные критерии $\pi_{Q_{II}}$, π_{C_K} , π_{μ} , π_d , π_{m_3} , π_{Δ_K} по физической значимости, путём последовательного деления одного частного π

– критерия на последующий, получили $\pi_{\text{КВТО}}$ – критерий подобия, который характеризует физико-механические свойства обрабатываемого материала при влажно-тепловой обработке (критерий эффективности),

$$\pi_{\text{КВТО}} = \frac{d}{m_3 \cdot \Delta_K \cdot C_K \cdot Q_{\Pi} \cdot \mu} \cdot \frac{P_H^{2,5} \cdot \tau^2}{T_H \cdot \rho^{0,5}}. \quad (5.49)$$

4) Численное значение объединённого критерия $\pi_{\text{КВТО}}$ после подстановки номинальных значений независимых параметров: $P_H = 24 \cdot 10^3$ Па; $T_H = 330$ °К; $\tau = 120$ с; $\rho = 0,25$ кг/м³ в уравнение 5.49 составило:

$$\pi_{\text{КВ}} = \frac{1,6,0 \cdot 10^{-3} \cdot (24 \cdot 10^3)^{2,5} \cdot 120^2}{2,0 \cdot 10^{-3} \cdot 21 \cdot 108 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^3 \cdot 3,2 \cdot 330 \cdot 0,5} = 15,5$$

5) Выразим из уравнения (5.48) значение выходной характеристики Δ_K и введя коэффициент условной микрокапиллярности Π отнесённой к отношению $\frac{d}{m_3}$:

$$\Delta_K = \frac{d}{m_3 \cdot \pi_{\text{вто}} \cdot C_K \cdot Q_{\Pi} \cdot \mu} \cdot \Pi \cdot \frac{P_H^{2,5} \cdot \tau^2}{T_H \cdot \rho^{0,5}}. \quad (5.50)$$

6) Граничные значения выходной характеристики функционирования подсистемы «влажно-тепловая обработка» и независимых параметров установлены на основе экспериментальных исследований в четвёртой главе:

$$\left. \begin{aligned} 19 \leq \Delta_{\dot{E}} \leq 22; \\ 0,02 \cdot 10^6 \leq P \leq 0,04 \cdot 10^6; \\ 330 \leq T \leq 340; \\ 120 \leq \tau \leq 150 \\ 0,25 \leq \rho \leq 0,28 \end{aligned} \right\} \quad (5.51)$$

7) После разложения в ряд Тейлора уравнения (5.50) получено выражение для выходной характеристики подсистемы в стохастическом смысле:

$$\Delta_{\text{кi}} = \Delta_{\text{к}} + \frac{A}{\pi_{\text{квто}}} \cdot \Pi \cdot \left[\frac{df}{dP} \cdot (P_{\text{cp}} - P_i) + \frac{df}{dT} \cdot (T_{\text{cp}} - T_i) + \frac{df}{d\tau} \cdot (\tau_{\text{cp}} - \tau_i) + \frac{df}{d\rho} \cdot (\rho_{\text{cp}} - \rho_i) \right], \quad (5.52)$$

где $A = \frac{d}{m} \cdot \frac{1}{C_K \cdot Q_{\Pi} \cdot \mu}$ – коэффициент связи параметров, характеризующих физи-

ко-механические свойства кожи;

$f = \frac{P_n^{2,5} \cdot \tau^2}{T_n \cdot \rho^{0,5}}$ – функция связи по независимым параметрам.

Значения частных производных функции связи $f = \frac{P_n^{2,5} \cdot \tau^2}{T_n \cdot \rho^{0,5}}$, вычислим,

подставив в них номинальные значения независимых параметров:

$$P_n = 24 \cdot 10^3 \text{ Па}; T_n = 330 \text{ }^0\text{К}; \tau = 120 \text{ с}; \rho = 0,25 \text{ кг/м}^3:$$

$$\frac{\partial f}{\partial P} = 8,11 \cdot 10^8, \frac{\partial f}{\partial T} = -2,36 \cdot 10^{10}, \frac{\partial f}{\partial \tau} = 1,3 \cdot 10^{11}, \frac{\partial f}{\partial \rho} = -1,56 \cdot 10^{13}.$$

Для нахождения средних значений параметров обработки $P_{\text{ср}}, T_{\text{ср}}, \tau_{\text{ср}}, \rho_{\text{ср}}$ использованы экспериментальные данные, приведённые в таблице 5.13.

Таблица 5.13 – Экспериментальные значения параметров процесса ВТО с применением вакуума

Обозначение параметров	Размерность	Средние значения параметров					
S_j (время – τ)	с	120	125	130	135	140	145
X_j (давление – P)	Па	$20 \cdot 10^3$	$22 \cdot 10^3$	$24 \cdot 10^3$	$26 \cdot 10^3$	$28 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$
Z_j (температура – T)	К	340	340,2	340,6	340,8	341	341
R_j (плотность – ρ)	кг/м ³	$25 \cdot 10^{-2}$	$25,5 \cdot 10^{-2}$	$26 \cdot 10^{-2}$	$26,5 \cdot 10^{-2}$	$27 \cdot 10^{-2}$	$27,5 \cdot 10^{-2}$

8) Строим графические зависимости для принятого интервала времени с учётом стохастического строения кожи, варьируя долей микрокапиллярной пористости кож хромового дубления от 0,1 до 0,4 общей пористости, условно определяемой в работе, как отношение толщины образца (d) к его массе (m) для различных способов подвода пара: с лицевой (рис. 5.15) и с бахтармянной сторон (рис. 5.16).

9) Проведя на полученных графиках прямые, соответствующие верхней и нижней границам значений выходной характеристики Δ_K , определяем интервал времени, соответствующий гарантированному гигротермическому воздействию при влажно-тепловой обработке кожевенно-обувных материалов с учётом их стохастического строения (микрокапиллярной пористости).

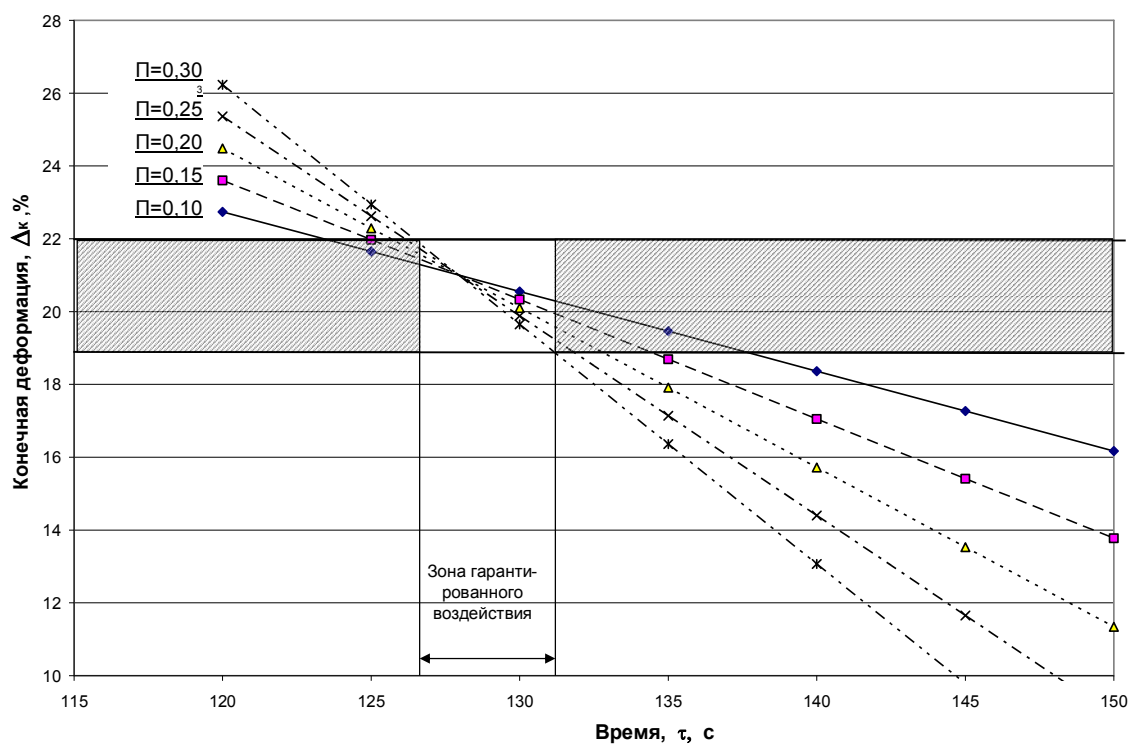


Рис. 5.15. Изменения конечной деформации Δ_k кож хромового дубления от условной микрокапиллярной пористости Π при ВТО в условиях вакуума (коэффициент диффузионного сопротивления $\mu = 7,5$)

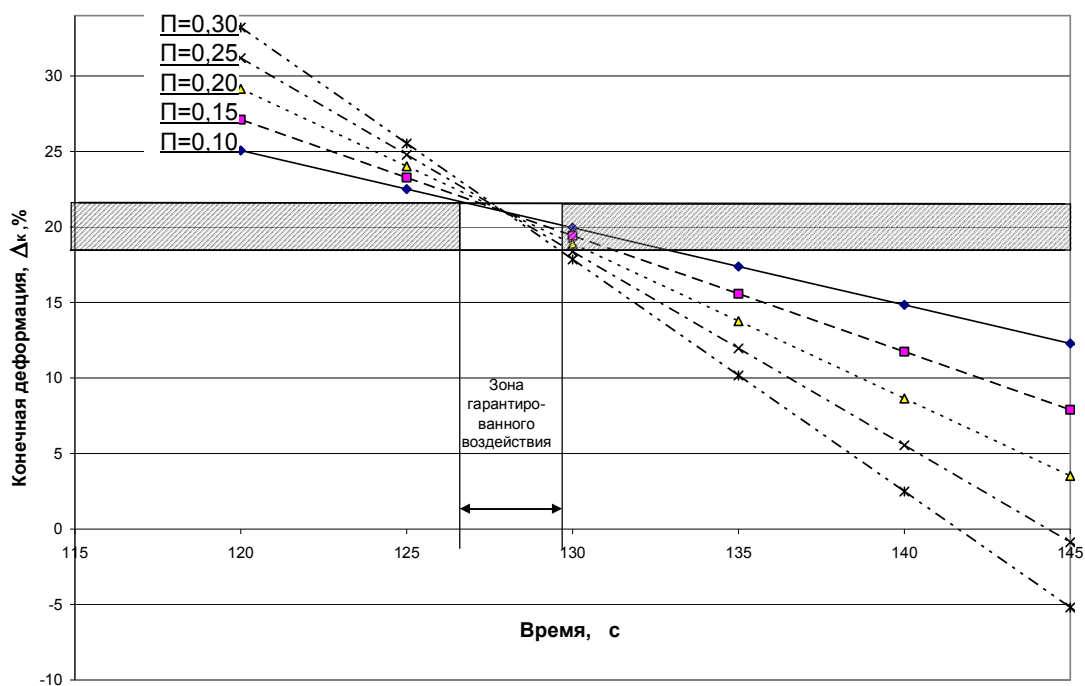


Рис. 5.16. Изменения конечной деформации Δ_k кож хромового дубления от условной микрокапиллярной пористости Π при ВТО в условиях вакуума (коэффициент диффузионного сопротивления $\mu = 3,2$)

10) Для установления подобия подсистем и в стохастическом смысле при обработке в течение минимально возможного времени, равного 126 с (рис. 5.16) и соответствующим ему значений: давления $P_n = 22 \cdot 10^3$ Па; температуры $T_n = 340$ °К; $\rho = 0,255$ кг/м³ находятся численные значения ошибок независимых параметров:

$$\delta_{X_j} = \frac{X_j - X_{j_0}}{X_j} = \Delta_p = (22-24)/22 = -0,09$$

$$\delta_{Z_j} = \frac{Z_j - Z_{j_0}}{Z_j} = \Delta_T = (340-330)/340 = 0,03$$

$$\delta_{S_j} = \frac{S_j - S_{j_0}}{S_j} = \Delta_\tau = (126-120)/126 = 0,05$$

$$\delta_{R_j} = \frac{R_j - R_{j_0}}{R_j} = \Delta_\rho = (0,255-0,25)/0,255 = 0,02$$

Численное значение функционала составило:

$$2,5*(-0,09) + 2*0,05 + 0,03 + 0,5*0,02 = -0,085.$$

Относительные отклонения (ошибки) номинальных значений характеристик функционирования подсистемы - $\delta_{y_{i_0}}^H, \delta_{y_{i_0}}^B$:

$$\delta_{y_{i_0}}^H = (19-22)/19 = -0,15,$$

$$\delta_{y_{i_0}}^B = (22-22)/22 = 0.$$

Полученное значение функционала (-0,085) находится в вычисленном интервале, то есть рассматриваемые подсистемы будут подобны и в стохастическом смысле.

Следовательно, рассмотренная методика позволяет определить зону допустимых значений выходного параметра подсистемы - Δ_K , в пределах которой можно задавать режимы ИГО, обеспечивающие требуемое качество обработки и корректировать длительность процесса с целью достижения его эффективности при обработке кож с возможным различным содержанием микрокапилляров (от 10 до 40 %).

**5.5.6. Математическая модель стохастического подоби́я функцио-
нирования подсистемы интенсифицированной гигротермической обра-
ботки кожевенно-обувных материалов – «технология» при совмещении
увлажнения, фиксации, сушки, влажно-тепловой обработки с использо-
ванием перфорированных колодок**

В соответствие с приведённой выше методикой:

1) Формируется функциональная зависимость по выходной характери-
стике подсистемы - D (коэффициент диффузии пара) от определяющих её
параметров (табл. 5.1), которая имеет вид:

$$DI = f(d, m_3, V_{мк}, Q_{п}, C_k, \mu, \varphi_{пс}, T_H, T_K, P_H, P_K, \tau, Q_T, K, P_{п}, \Delta P; F_{ф}, V_K, I, \rho, C_B, C_{по}, R_{по}) \quad (5.53)$$

2) Для формирования частных критериев подоби́я функционирования
подсистем используем программу расчёта критериев ($K_{rin} N \times N$), разработан-
ную на кафедре «Машины и оборудование бытового и жилищно-
коммунального назначения» ИСОиП (филиала) ДГТУ.

При этом в качестве независимых параметров принимаются: температура – T , давление в камере – P , время воздействия – τ , плотность паровоз-
душной среды – ρ .

Полученные выражения для частных критериев подоби́я имеют вид:

$$\begin{aligned} \pi(d) &= d / (T_H^0 \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^1 \cdot \rho^{-0,5}) = 1,0 \cdot 10^{-8} \\ \pi(m_3) &= m_3 / (T_H^0 \cdot P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-0,5}) = 2,51 \cdot 10^{-17} \\ \pi(V_{мк}) &= V_{мк} / (T_H^0 \cdot P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}) = 2,58 \cdot 10^{-19} \\ \pi(E_K) &= E_K / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 1100 \\ \pi(E_K) &= E_K / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 29 \\ \pi(\delta_{кр}) &= \delta_{кр} / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 950 \\ \pi(Q_{п}) &= Q_{п} / (T_H^0 \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^0 \cdot \rho^{0,5}) = 1493,94 \\ \pi(C_K) &= C_K / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 6,76 \\ \pi(\mu) &= \mu / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 3,2 \\ \pi(\varphi_{пс}) &= \varphi_{пс} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 0,97 \\ \pi(T) &= T / (T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 1,02 \\ \pi(P) &= P / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 2 \\ \pi(D) &= D / (T_H^0 \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^{-1} \cdot \rho^{-0,5}) = 7,26 \cdot 10^{-5} \\ \pi(C_B) &= C_B / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 8,04 \\ \pi(R_{по}) &= R_{по} / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 2015,52 \\ \pi(C_{по}) &= C_{по} / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 0,02 \\ \pi(V_K) &= V_K / (T_H^0 \cdot P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}) = 9,04 \cdot 10^{-17} \\ \pi(Q_T) &= Q_T / (T_H^0 \cdot P_H^{2,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}) = 1,02 \cdot 10^{-16} \\ \pi(I) &= I / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^{-1} \cdot \rho^{-1}) = 5,67 \cdot 10^{-21} \end{aligned} \quad (5.54)$$

3) Объединяя полученные критерии $\pi_I, \pi_\mu, \pi_T, \pi_D, \pi_d, \pi_P$ по физической значимости, путём последовательного деления одного частного π -критерия на последующий, получили $\pi_{T\Sigma}$ – критерий подобия, характеризующий основные физические параметры процессов (критерий интенсивности):

$$\pi_{T\Sigma} = \frac{T_n}{P_n^{0,5} \cdot D \cdot I \cdot \mu} \cdot \frac{P}{T \cdot \tau^2 \cdot \rho^{1,5}}. \quad (5.55)$$

4) Численное значение объединённого критерия $\pi_{T\Sigma}$ после подстановки номинальных значений независимых параметров: $P = 40 \cdot 10^3$ Па; $T = 338$ °К; $\rho = 0,26$ кг/м³ время воздействия – $\tau = 360$ с в уравнение (5.55) составило:

$$\pi_{T\Sigma} = \frac{323 \cdot 40 \cdot 10^3}{(20 \cdot 10^3)^{0,5} \cdot 0,83 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 10^{-24} \cdot 3,2 \cdot 338 \cdot 360^2 \cdot 0,26^{1,5}} = 1,78 \cdot 10^{26}.$$

5) Из обобщённого критериального выражения для критерия эффективности при совмещении операций получаем – D:

$$D = \frac{T_n}{P_n^{0,5} \cdot I \cdot \mu} \cdot \frac{P}{T \cdot \tau^2 \cdot \rho^{1,5} \cdot \pi_{T\Sigma}}. \quad (5.56)$$

6) Граничные значения выходной характеристики функционирования подсистемы и независимых параметров установлены на основе экспериментальных исследований, выполненных в четвёртой главе:

$$\left. \begin{aligned} -0,83 \cdot 10^{-4} &\leq D \leq 0,83 \cdot 10^{-4}; \\ 0,02 \cdot 10^6 &\leq P \leq 0,05 \cdot 10^6; \\ 328 &\leq T \leq 333; \\ 120 &\leq \tau \leq 480, \\ 0,16 &\leq \rho \leq 0,36 \end{aligned} \right\} \quad (5.57)$$

6) После разложения в ряд Тейлора уравнения (5.56) получено выражение для выходной характеристики подсистемы в стохастическом смысле

$$D_i = D_n + A * K * \left[\frac{df}{dP} * (P_{cp} - P_i) + \frac{df}{dT} * (T_{cp} - T_i) + \frac{df}{d\tau} * (\tau_{cp} - \tau_i) + \frac{df}{d\rho} * (\rho_{cp} - \rho_i) \right], \quad (5.58),$$

где $A = \frac{T_n}{P_n^{0,5} * \pi_{T\Sigma} * I * \mu}$ – коэффициент связи параметров характеризующих интенсивность процесса;

D_n – номинальное значение коэффициента диффузии пара, равное $0,83 \cdot 10^{-4}$ м²/с;

$K = v / v^1$ – коэффициент изменения первоначального объёма рабочей камеры v ;

$\pi_{T\Sigma}$ – критерий подобия, критерий подобия, характеризующий основные физические параметры процесса технологии при совмещении операций;

I – номинальное значение критерия интенсивности, равное $4,00 \cdot 10^{-24}$ кг/с*м³;

$f = \frac{P}{T \cdot \tau^2 \cdot \rho^{1,5}}$ – функция связи по независимым параметрам.

Значения частных производных функции связи – $f = \frac{P}{T \cdot \tau^2 \cdot \rho^{1,5}}$, вычислены при подстановке в них их номинальных значений $P = 40 \cdot 10^3$ Па; $T = 338$ °К; $\rho = 0,26$ кг/м³ время воздействия – $\tau = 360$ с

$$\frac{\partial f}{\partial T} = -2,52 \cdot 10^{-4}, \quad \frac{\partial f}{\partial \tau} = -1,38 \cdot 10^{-3}, \quad , \quad \frac{\partial f}{\partial \rho} = -7,75 \cdot 10^{-1}, \quad \frac{\partial f}{\partial P} = 3,31 \cdot 10^{-6}.$$

Для нахождения средних значений параметров обработки P_{cp} , T_{cp} , τ_{cp} , ρ_{cp} воспользуемся экспериментальными данными, полученными в работе и приведёнными в таблице 5.14.

Таблица 5.14 – Экспериментальные значения параметров процессов подсистемы «технология»

Обозначение параметров	Размерность	Средние значения параметров					
S_j (время – τ)	с	180	240	300	360	420	480
X_j (давление – P)	Па	$27 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	$40 \cdot 10^3$	$45 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$
Z_j (температура – T)	К	329	330	330,5	331,0	332	333
R_j (плотность – ρ)	кг/м ³	$17 \cdot 10^{-2}$	$19 \cdot 10^{-2}$	$22 \cdot 10^{-2}$	$26 \cdot 10^{-2}$	$31 \cdot 10^{-2}$	$36 \cdot 10^{-2}$

8) Строим графические зависимости для принятого интервала времени с учётом стохастического строения кожи, варьируя коэффициентом K - изменения первоначального объёма рабочей камеры v от 0,1 до 0,4;

9) Анализируя полученные графики, определяем интервалы времени, соответствующие гарантированному гигротермическому воздействию при

увлажнении (коэффициент диффузии D положителен) и система стохастически подобна и сушке (коэффициент диффузии D отрицателен).

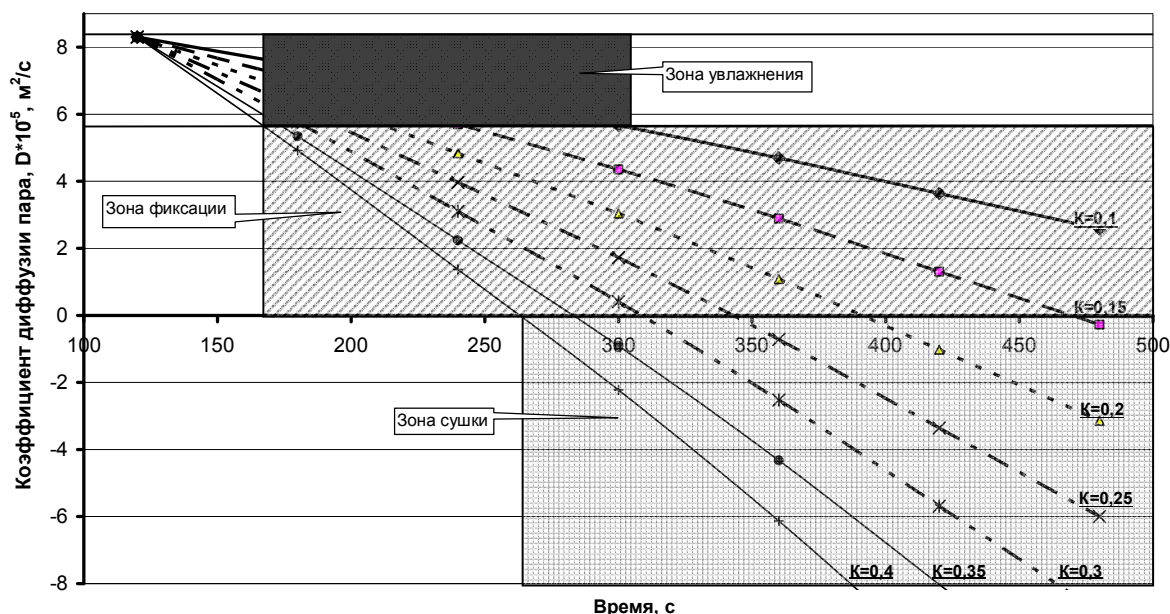


Рис. 5.17. Изменения коэффициента диффузии пара D от времени ИГО при параллельно-последовательном совмещении операций

ВЫВОДЫ

1. Теория стохастического подоби́я функционирования технических систем послужила основой для разработки нового подхода к нахождению функционального вида многопараметрических зависимостей между параметрами процессов ИГВ и показателями физико-механических свойств натуральных кож.

2. На основе теории стохастического подоби́я функционирования технических систем разработан метод прогнозирования результатов интенсифицированного гигротермического воздействия на натуральные кожевенно-обувные материалы.

3. На основе нового метода прогнозирования разработаны методики расчёта и получены численные значения критериев для всех видов ИГВ:

π_{Ki} – критерий подобия, который характеризует физико-механические свойства объекта технологии (обрабатываемой кожи) – критерий эффективности;

π_{Ti} – критерий подобия, который характеризует основные физические параметры процесса технологии – критерий интенсивности;

π_{Ci} – критерий подобия, который характеризует параметры средства технологии – критерий пригодности;

4. Для использования полученных критериев в подсистемах одного функционального назначения, но с разными внутренними физическими процессами, функционально подобных в стохастическом смысле, определены допуски на изменение выходных величин подсистем.

5. Обосновано использование для управления процессами ИГВ аналитических критериальных зависимостей, полученных на основе метода стохастического подобия функционирования технических систем, которые позволяют задавать режимы ИГО, обеспечивающие требуемое качество обработки. И наоборот, обладая априорной информацией о свойствах обрабатываемых материалов и значениях режимов ИГО, позволяют прогнозировать ожидаемую величину критерия, сравнивать её с эталонным значением (соответствующим требуемому качеству обработки) и по результатам сравнительного анализа корректировать процесс ИГО с целью достижения его эффективности.

ГЛАВА 6. СИСТЕМА КОНСТРУКТОРСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИГО

6.1. Подсистема формирования технического состояния оборудования для ИГО на этапе проектирования

6.1.1. Методология и пример разработки подсистемы «оборудование для увлажнения»

Метод подобия функционирования технических систем даёт возможность исследовать вопросы совершенствования конструкции при проектировании оборудования для ИГО [84].

Опыт эксплуатации зарубежного специализированного оборудования [16] для увлажнения обувных заготовок в условиях вакуума показывает, что необходимость откачки воздуха, находящегося при атмосферном давлении в рабочей камере до обеспечения требуемой степени вакуума, увеличивает время полного цикла увлажнения, а вакуумный насос при этом вынужден работать в условиях, повторяющихся из цикла в цикл включений (при вакуумировании) и отключений (при пропаривании) [150].

Согласно методологии, приведённой в разделе 5.5, были реализованы принципы создания устройства для увлажнения обувных заготовок в условиях вакуума на основе обобщённой критериальной зависимости:

$$P_n^4 = \frac{d \cdot m \cdot V_{M.K} \cdot T_K \cdot C_K^{3,5} \cdot \rho \cdot C_{ПО} \cdot Q_T \cdot D \cdot \varphi_{П.С} \cdot Q_{П}}{T_H^{0,5} \cdot P_K \cdot C_B \cdot R_{ПО} \cdot I \cdot V_K^{1,33} \cdot \mu \cdot \tau} \cdot 0,69 \quad (6.1)$$

Из анализа приведённой зависимости следует, что для повышения интенсивности увлажнения, при постоянном значении критерия подобия $\pi_i = idem = const$ (условие подобия технического состояния подсистем), необходимо менять значения каких-либо параметров или их комплексов, например давления P_n .

Для сокращения времени полного цикла увлажнения, повышения производительности и надёжности на этапе проектирования оборудования для увлажнения в условиях вакуума предложена конструкция устройства для вакуумного увлажнения заготовок обуви (рис. 6.1).

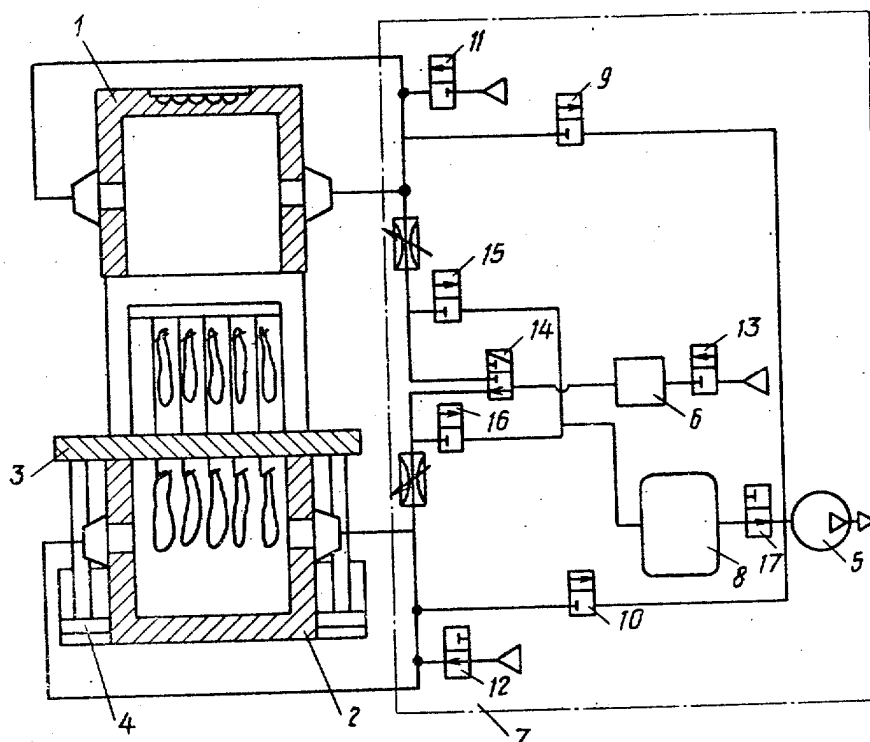


Рис. 6.1. Принципиальная схема устройства для вакуумного увлажнения заготовок обуви

Устройство содержит две вакуумные камеры 1 и 2 с отверстиями для подвода рабочего агента, подвижную крышку 3 для герметизации камер, привод 4 подвижной крышки, вакуумный насос 5, парогенератор 6, систему управления 7 и вакуумированную ёмкость 8.

Система управления 7 включает в себя клапан отсечки 9 верхней вакуумной камеры 1 и клапан отсечки 10 нижней вакуумной камеры 2 от вакуумного насоса 5, клапаны напуска воздуха 11 и 12 соответственно в камеры 1 и 2, клапан 13 дозатора подачи воды в парогенератор 6, переключатель 14 и отсечные клапаны 15 и 16, соединяющие вакуумированную ёмкость 8 соответственно с камерами 1 и 2, и клапан отсечки 17.

В исходном положении верхняя вакуумная камера 1 открыта, нижняя камера 2 закрыта подвижной крышкой 3, вакуумный насос 5 включен и через клапан отсечки 17 соединён с вакуумированной ёмкостью 8, клапаны отсечки 9 и 10 закрыты. Клапан напуска воздуха 11 в верхнюю камеру закрыт, клапан 12 открыт, клапан 13 дозатора подачи воды в парогенератор 6 закрыт. Переключатель 14 соединяет нижнюю вакуумную камеру с парогенератором 6.

Устройство для увлажнения заготовок обуви работает следующим образом. Связки заготовок обуви завешивают на крючки держателей крышки 3. После этого включают привод 4 и перемещают крышку 3 в верхнее положение. Одновременно с перемещением крышки 3 переключатель 14 включают на верхнюю камеру 1, а клапан напуска воздуха 12 закрывают. После герметизации камеры 1 открывают клапаны 9 и 15, соединяющие ее с вакуумным насосом 5 и вакуумированной ёмкостью 8. Происходит вакуумирование верхней камеры 1. После достижения необходимого вакуума отсекают клапанами 9 и 15 камеру 1 от ёмкости 8 и насоса 5 и включают клапан 13 дозатора подачи воды в парогенератор 6. Пар поступает в камеру 1 и увлажняет заготовки. Давление в камере 1 постепенно повышается в течение определённого времени. После достижения заданного давления клапан 13 отключают, а затем по истечении заданного времени увлажнения включают клапан напуска воздуха 11 для повышения давления в камере до атмосферного. При этом во время процесса увлажнения вакуумированная ёмкость, соединённая клапаном отсечки 17 с насосом 5, дополнительно вакуумируется, а следующие заготовки обуви завешивают на держатели, расположенные на нижней поверхности крышки 3. По истечении полного цикла увлажнения крышку 3 перемещают в нижнее положение. Далее цикл повторяется для нижней камеры 2.

Соединение камер 1 с вакуумированной ёмкостью 8 позволяет резко снизить давление в камере 1 и уменьшить время вакуумирования камеры из-за меньшего начального давления в последней. Это сокращает время процесса увлажнения, т.е. повышает производительность установки, а также позволяет рациональнее использовать вакуумный насос [89].

Новизна конструкторского решения защищена авторским свидетельством СССР №1099944 «Устройство для вакуумного увлажнения заготовок обуви»[10].

6.1.2. Методология и пример разработки подсистемы «оборудование для увлажнения, формования и сушки»

По аналогии с методологией, приведённой в разделе 5.5, были реализованы принципы создания устройства для интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви с параллельно-последовательным совмещением операций увлажнения, формования и сушки, выполняемых в одной рабочей камере с использованием перфорированных колодок. Для создания такого устройства использовался объединённый критерий интенсивности при совмещении операций (табл. 5.5), в состав параметров которого входит коэффициент диффузии D :

$$D = \frac{T_n}{P_n^{0,5} \cdot \pi_T \Sigma} \cdot \frac{P_K}{T_K \cdot \tau^2 \cdot \rho^{1,5}}. \quad (6.2)$$

Величина коэффициента диффузии с течением времени гигротермической обработки в условиях вакуума меняется с положительной (при увлажнении) на отрицательную (при сушке), что и послужило идеей создания устройства [116], приведённого на рисунке 6.2.

Новизна предложенного технического решения защищена патентом РФ № 2312574 «Устройство для вакуумного увлажнения, формования и сушки заготовок верха обуви» [116].

6.1.3. Методология и пример разработки подсистемы «оборудование для гигротермической фиксации»

Согласно методологии, приведённой в разделе 5.5, были реализованы принципы создания устройства для гигротермической фиксации заготовок верха обуви в рабочей камере с использованием перфорированных колодок. Для создания такого устройства использовалась обобщённая критериальная зависимость полной деформации при влажно-тепловой фиксации (5.15):

$$\Delta_{\text{Полн}} = \frac{d \cdot P_{\text{П}} \cdot T_{\text{К}} \cdot \varphi_{\text{П.С}} \cdot \tau \cdot F_{\Phi} \cdot T_{\text{Н}}}{\Delta P \cdot \mu \cdot V_{\text{К}} \cdot C_{\text{К}}^{0,5} \cdot Q_{\text{П}}} \cdot 0,11. \quad (6.3)$$

Из анализа приведённой зависимости следует, что для повышения полной деформации, при постоянном значении критерия подобия $\pi_i = idem = const$ (условие подобия технического состояния подсистем), необходимо менять значения каких-либо параметров или их комплексов, например, приформовочного давления $P_{\text{П}}$, для чего в разработанном устройстве используется воздух, откачиваемый вакуумным насосом из рабочей камеры при её вакуумировании [82].

Предлагаемое устройство содержит верхнюю вакуумную камеру 1, нижнюю вакуумную камеру 2, загрузочный отсек 3, выполненный в виде ёмкости, герметично закрывающуюся дверь 4, жёстко закреплённую сменную перфорированную перегородку 5, вакуумный насос 6, ёмкость 7 для воды, со встроенными электронагревателями 8, вакуумированную ёмкость 9, систему автоматического управления 10. Система автоматического управления 10 включает в себя клапан 11 отсечки верхней камеры 1 от вакуумного насоса 6, клапан 12 отсечки нижней камеры 2 от вакуумного насоса 6, клапаны 13 и 14 напуска воздуха в обе вакуумные камеры, клапан 15 отсечки верхней камеры 1 от вакуумированной ёмкости 9, клапан 16 отсечки нижней камеры 2 от вакуумированной ёмкости 9, клапан 17 отсечки вакуумированной ёмкости 9 от вакуумного насоса 6.

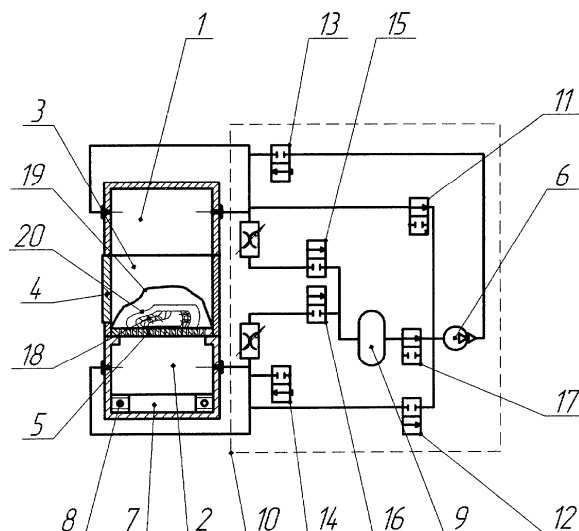


Рис. 6.2. Принципиальная схема устройство для гигротермической фиксации заготовок верха обуви

Новизна предложенного технического решения защищена патентом РФ № 2312573 «Устройство для гигротермической фиксации заготовок верха обуви»[115].

6.2. Подсистема формирования технического состояния оборудования для ИГО на этапе его модернизации

6.2.1. Методология и пример разработки подсистемы «оборудование для увлажнения со сниженной энергоёмкостью»

С целью упрощения конструкции и снижения энергоёмкости устройства для вакуумного увлажнения заготовок обуви, рассмотренного в разделе 6.1.1, загрузочный отсек выполнен в виде ёмкости с герметично закрываемой дверью, подсоединённой своими открытыми торцами к загрузочным торцам камер, а крышка представляет собой поршень, свободно установленный в ёмкости (рис. 6.3). На рисунке 6.3 изображена принципиальная схема устройства.

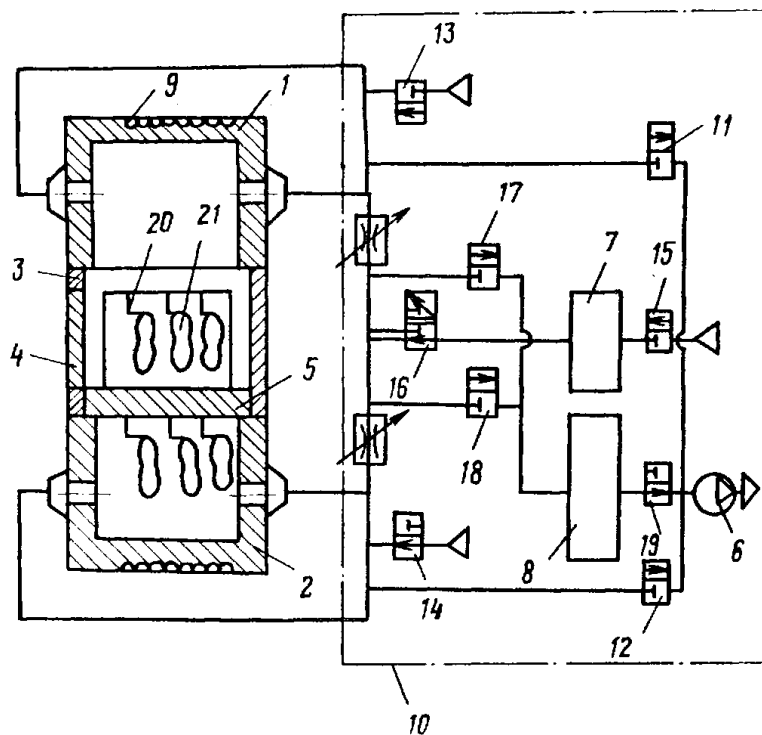


Рис. 6.3. Принципиальная схема устройства для вакуумного увлажнения
Устройство содержит вакуумные камеры 1 и 2, загрузочный отсек 3, выполненный в виде ёмкости, герметично закрывающуюся дверь 4, крышку 5,

представляющую собой поршень, вакуумный насос 6, парогенератор 7, вакуумированную ёмкость 8, низкотемпературные нагреватели 9 и систему 10 автоматического управления. Система 10 включает в себя клапан 11 отсечки верхней вакуумной камеры 1 от вакуумного насоса 6, клапан отсечки 12 нижней вакуумной камеры 2 от вакуумного насоса 6, клапаны 13 и 14 напуска воздуха в обе вакуумные камеры, клапан 15 подачи воды в парогенератор переключатель 16 сообщения парогенератора 7 с вакуумными камерами 1 и 2, клапан 17 отсечки верхней камеры 1 от вакуумированной ёмкости 8, клапан 18 отсечки нижней вакуумной камеры 2 от вакуумированной ёмкости, клапан 19 отсечки вакуумированной ёмкости 8 от вакуумированного насоса 6, держатели 20 заготовок 21.

В исходном положении вакуумированная камера 1 открыта, нижняя камера 2 закрыта подвижной крышкой-поршнем 5, загрузочно-выгрузочный отсек 3 загерметизирован дверью 4, нагреватели 9 включены в обеих камерах. Вакуумный насос 6 соединён через клапан отсечки 19 с вакуумированной ёмкостью 8. Клапаны отсечки 11 и 12 вакуумных камер 1 и 2 от вакуумного насоса 6 закрыты, клапаны отсечки 17 и 18 вакуумных камер 1 и 2 от вакуумированной ёмкости 8 закрыты. Клапан 13 напуска воздуха в верхнюю камеру 1 закрыт, клапан 14 напуска воздуха в нижнюю камеру открыт. Клапан 15 дозатора подачи воды в парогенератор 7 закрыт. Переключатель 16 сообщения парогенератора 7 с вакуумными камерами включен на нижнюю вакуумную камеру 2.

Устройство работает следующим образом.

Открыв дверь 4, завершают на держатели 20, находящиеся в загрузочно-выгрузочном отсеке 3, связки заготовок обуви 21. После этого дверью 4 герметизируют загрузочно-выгрузочный отсек. Одновременно с герметизацией двери 4 клапаны 11 и 17 соединяют верхнюю часть устройства, состоящего из верхней рабочей камеры 1 и загрузочно-выгрузочного отсека 3 с вакуумным насосом 6 и вакуумированной ёмкостью 8, а клапан 14 напуска воздуха в нижнюю рабочую камеру открывают. В результате возникшей разности давлений в верхней части устройства и нижней камере поршень-крышка 5

с заготовками обуви 21 перемещается вверх до упора в загрузочный торец верхней рабочей камеры и герметизирует ее. Происходит дальнейшее вакуумирование верхней камеры до нужной степени. После достижения необходимого по технологическому процессу вакуума отсекают клапанами 11 и 17 верхнюю камеру от насоса 6 и вакуумированной ёмкости 8, при этом открывают клапан 19, соединяющий насос 6 с ёмкостью 8. Одновременно с этим включается клапан 15 дозатора подачи воды в парогенератор 7, и пар поступает через переключатель 16 в верхнюю камеру и увлажняет заготовки. В это время открывают дверь 4 и на держатели 20 крышки-поршня 5 навешивают следующие заготовки обуви. После заданного времени увлажнения загрузочно-выгрузочный отсек 3 с имеющимися уже там заготовками герметизируют дверью 4 и включают клапан 13 напуска воздуха в верхнюю камеру 1, а нижнюю камеру 2 соединяют клапанами 12 и 18 с вакуумным насосом 6 и вакуумированной ёмкостью 8. Далее цикл повторяется для нижней камеры.

Новизна конструкторского решения защищена авторским свидетельством СССР № 1391589 «Устройство для вакуумного увлажнения заготовок обуви» [11].

6.2.2. Методология и пример разработки подсистемы «оборудование для увлажнения с парогенератором внутри камеры»

По аналогии с методологией, приведённой в разделе 5.5, были реализованы принципы создания устройства для интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви в условиях вакуума, со сниженным энергопотреблением. Для этих целей использовалась полученная обобщённая критериальная зависимость интенсивности увлажнения (табл. 5.5), из которой при постоянном значении критерия подобия $\pi_i = idem = const$ (условие подобия технического состояния подсистем), выражено количество теплоты, требуемое для получения пара, получаемого при пониженных давлении и температуре:

$$Q_T = \frac{T_H^{0,5} \cdot P_K \cdot C_B \cdot R_{ПО} \cdot V_K^{1,33} \cdot P_H^4 \cdot \mu \cdot \tau \cdot I}{d \cdot m \cdot V_{М.К.} \cdot T_K \cdot C_K^{3,5} \cdot \rho \cdot C_{ПО} \cdot D \cdot \varphi_{П.С} \cdot Q_{П}} \cdot 0,69. \quad (6.5)$$

Для обеспечения этих условий в разработанном устройстве парогенератор выполнен в виде двух полых торов, расположенных внутри соответствующих вакуумных камер по их периметру и при их вакуумировании вместе с заготовками обуви обеспечивается получение пара при давлении 0,01-0,02 МПа и температуре 60–70 °С.

Устройство содержит верхнюю вакуумную камеру 1, свод которой выполнен в виде конуса с углом в сечении при вершине 60° для стекания конденсата, нижнюю вакуумную камеру 2, загрузочный отсек 3, выполненный в виде ёмкости 1, герметично закрывающуюся дверь 4, крышку 5, представляющую собой поршень, выполненный в виде конуса с углом в сечении при вершине 60° для стекания конденсата, вакуумный насос 6, ёмкости 7 для воды со встроенными в них электронагревателями 8 вакуумированную ёмкость 9, систему 10 автоматического управления. Система 10 включает в себя клапан 11 отсечки верхней камеры 1 от вакуумного насоса 6, клапан 12 отсечки нижней камеры-2 от вакуумного насоса 6, клапаны 13 и 14 напуска воздуха в обе вакуумные камеры; клапан 15 отсечки верхней камеры 1 от вакуумированной ёмкости 9, клапан 16 отсечки нижней вакуумной камеры 2 от вакуумированной ёмкости 9, клапан 17 отсечки вакуумированной ёмкости 9 от вакуумного насоса 6, держатели 18 заготовок 19.

В исходном положении вакуумная камера 1 открыта, нижняя камера 2 закрыта подвижной крышкой - поршнем 5, выполненным в виде конуса с углом 60° при вершине. Загрузочный отсек 3 загерметизирован дверью 4, электронагреватели 8 включены в обеих ёмкостях 7 для воды. Вакуумный насос 6 соединён через клапан 17 отсечки с вакуумированной ёмкостью 9, клапаны 11 и 12 отсечки вакуумных камер 1 и 2 от вакуумного насоса 6 и клапаны 15 и 16 отсечки вакуумных камер 1 и 2 от вакуумированной ёмкости 9 закрыты. Клапан 13 напуска воздуха в верхнюю камеру 1 закрыт, а клапан 14 напуска воздуха в нижнюю камеру 2 открыт.

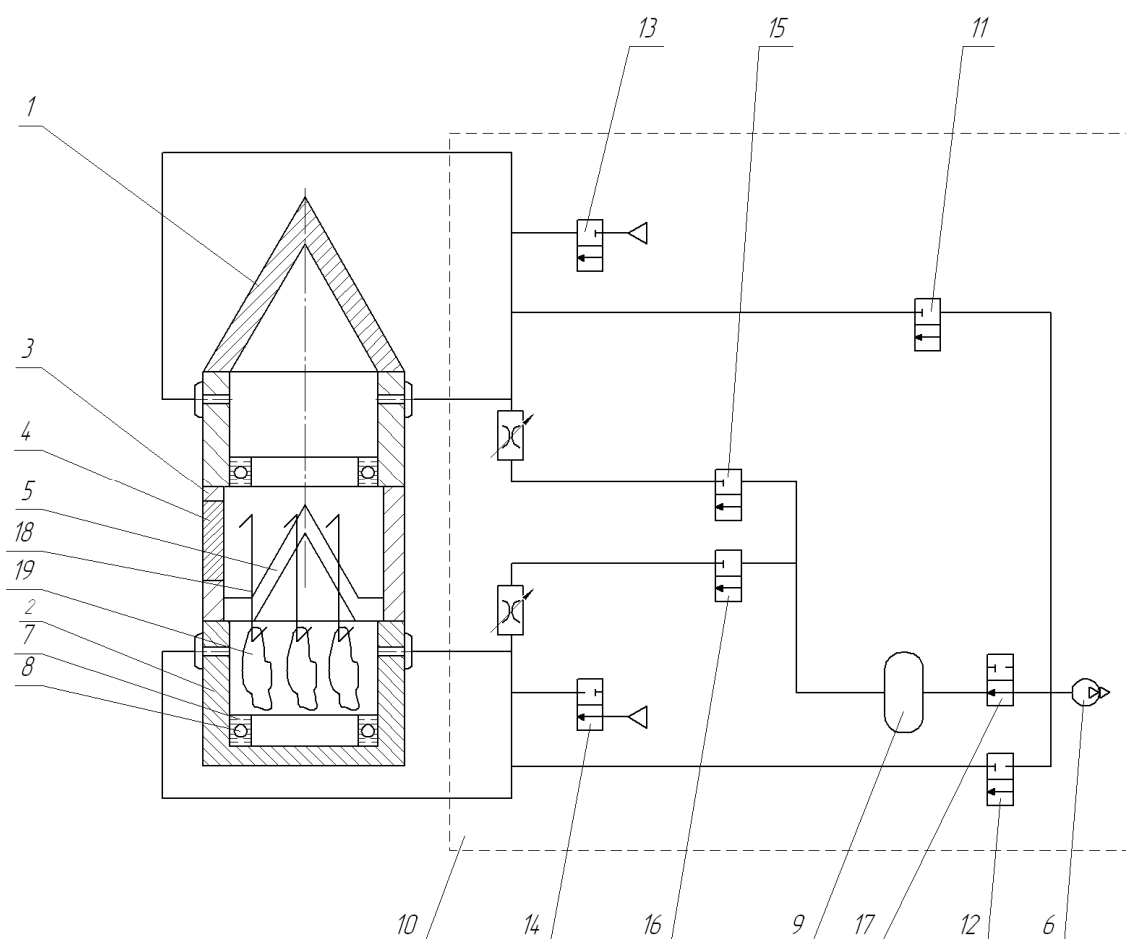


Рис. 6.4. Принципиальная схема устройства для вакуумного увлажнения заготовок обуви с парогенератором внутри камер

Устройство работает следующим образом. Открыв дверь 4, завешивают на держатели 18, находящиеся в загрузочно-выгрузочном отсеке 3, связки заготовок 19 обуви, включают электронагреватели 8 ёмкости 7 для воды в верхней камере 1. После этого дверь 4 герметизируют загрузочно-выгрузочный отсек. Одновременно с герметизацией двери 4 клапаны 11 и 15 соединяют верхнюю часть устройства, состоящего из верхней камеры 1, загрузочного отсека 3 с вакуумным насосом 6 и вакуумированной ёмкостью 9, а клапан 14 напуска воздуха в нижнюю камеру открывают. В результате возникшей разности давлений в верхней части устройства и нижней камере 2 поршень-крышка 5 с заготовками 19 перемещается вверх до упора в загрузочный торец верхней рабочей камеры и герметизирует ее. Происходит дальнейшее вакуумирование верхней камеры до момента закипания воды в ёмкости 7. после

чего отсекают клапанами 11 и 15 верхнюю камеру 1 от насоса 6 и вакуумированной ёмкости 9. выдерживают заготовки обуви в паровой среде, увлажняя их. В это время открывают дверь 4 и на держатели 18 крышки-поршня 5 навешивают следующие заготовки обуви. После заданного времени увлажнения загрузочно-выгрузочный отсек 3 с имеющимися уже там заготовками герметизируют дверью 4 и включают клапан 13 напуска воздуха в верхнюю камеру 1, а нижнюю камеру 2 соединяют клапанами 12, 16 с вакуумным насосом 9. Далее цикл повторяется для нижней камеры.

Новизна конструкторского решения защищена авторским свидетельством СССР № 1715294 «Устройство для вакуумного увлажнения заготовок обуви» [14].

6.2.3. Методология и пример разработки подсистемы «оборудование для увлажнения с регулируемым объёмом рабочей камеры»

Для создания устройства для увлажнения заготовок верха обуви с регулируемым объёмом рабочей камеры использовался полученный ранее π_{Ci} – критерий подобия (табл. 5.5), который характеризует пригодность оборудования для выполнения на нём той или иной операции ИГО.

В случае пригодности средства для увлажнения критерий определялся по приведённому ниже выражению:

$$\begin{aligned} \pi_{Cy} &= \frac{V_K}{P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}} : \frac{C_{по}}{P_H \cdot \rho^{-1}} = \frac{V_K \cdot P_H \cdot \rho^{-1}}{C_{по} \cdot P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}} = \\ &= \frac{V_K}{C_{по} \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-0,5}} : \frac{Q_m}{P_H^{2,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}} = \frac{V_K \cdot P_H^2}{Q_T \cdot C_{по} \cdot \rho} = \\ &= \frac{9 \cdot 10^{-2} \cdot (20^2 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 26 \cdot 10^{-2}} = \frac{36,00}{1,04} = 34,6 \end{aligned} \quad (6.6)$$

Из последнего выражения получена плотность пара ρ :

$$\rho = \frac{m}{V_{K_k}} = \frac{V_K \cdot P_H^2}{Q_T \cdot C_{по} \cdot \pi_c} \quad (6.7)$$

Масса пара составила:

$$m = \frac{V_K^2 \cdot P_H^2}{Q_T \cdot C_{по} \cdot \pi_c} \quad (6.8)$$

Анализ полученной зависимости позволил сделать ряд выводов.

1. На плотность пара влияют те же параметры, которые традиционно используются при исследовании состояния пара, что свидетельствует о корректности использования рассматриваемого критерия.

2. Для увлажнения различного по объёму количества заготовок требуется различное количество пара, находящегося в насыщенном состоянии.

3. В соответствии с положениями метода подобия функционирования технических систем можно сделать заключение, что для достижения требуемой массы пара, при постоянном значении критерия подобия $\pi_i = idem = const$ (условие подобия технического состояния подсистем), необходимо менять значения каких-либо параметров или их комплексов, например объёма.

На основе сформулированных выводов разработано устройство для увлажнения заготовок верха обуви с регулируемым объёмом рабочей камеры, приведённое на рисунке 6.5.

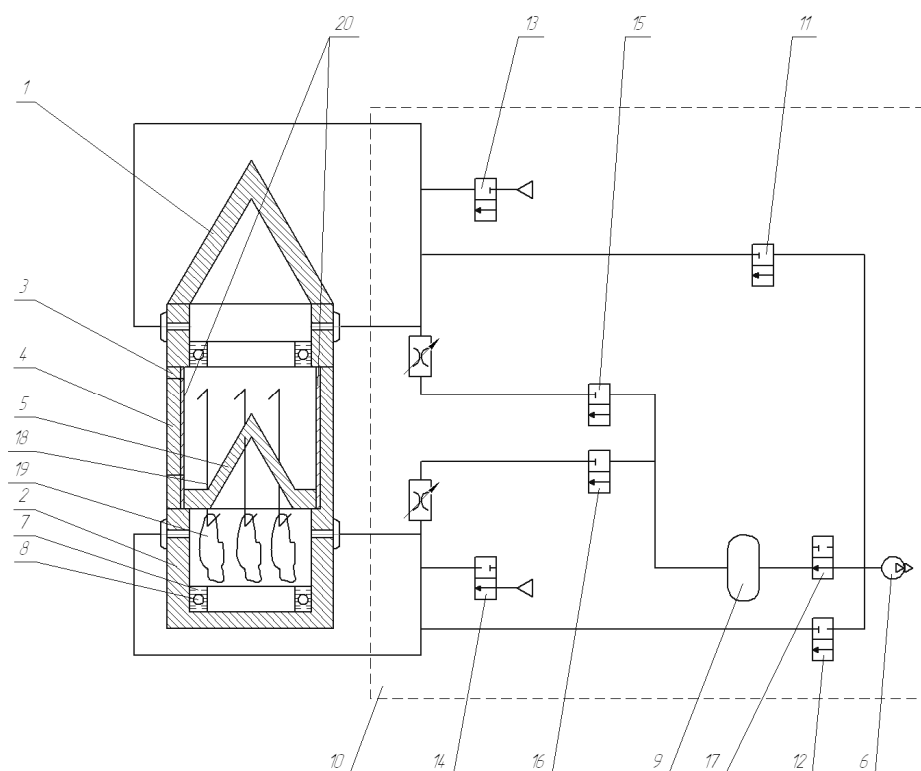


Рис. 6.5. Принципиальная схема устройства для увлажнения заготовок верха обуви с регулируемым объёмом рабочей камеры

Предлагаемое устройство содержит верхнюю вакуумную камеру 1, свод которой выполнен в виде конуса с углом в сечении при вершине 60° для отекания конденсата, вакуумную камеру 2, загрузочный отсек 3, выполненный в виде ёмкости, герметично закрывающуюся дверь 4, крышку 5, представляющую собой поршень, выполненный в виде конуса с углом в сечении при вершине 60° для отекания конденсата, которая может перемещаться по направляющим 20, вакуумный насос 6, ёмкость 7 для воды со встроенными в них электронагревателями 8, вакуумированную ёмкость 9, систему 10 автоматического управления. Система автоматического регулирования 10 включает в себя клапан 11 отсечки верхней камеры I от вакуумного насоса 6, клапан 12 отсечки нижней камеры 2 от вакуумного насоса 6, клапаны 13 и 14 пуска воздуха в обе вакуумные камеры; клапан 15 отсечки верхней камеры 1 от вакуумированной ёмкости 9, клапан 16 отсечки нижней вакуумной камеры 2 от вакуумированной ёмкости 9, клапан 17 отсечки вакуумированной ёмкости 9 от насоса 6б, держатели 18 заготовок 19.

В исходном положении вакуумная камера 1 открыта, нижняя камера 2 закрыта движной крышкой - поршнем 5, выполненным в виде конуса с углом 60° при вершине. Загрузочный отсек 3 загерметизирован, электронагреватели 8 включены в обеих ёмкостях 7 для воды. Вакуумный насос 6 соединён через клапан 17 отсечки с вакуумированной ёмкостью 9, клапаны 11, 12 отсечки вакуумных камер 1 и 2 от вакуумного насоса 6 и клапаны 15 и 16 отсечки вакуумных камер I и 2 от вакуумированной ёмкости 9 закрыты. Клапан 13 напуска воздуха в верхнюю камеру 1 закрыт, а клапан 14 напуска воздуха в нижнюю камеру 2 открыт.

Устройство работает следующим образом.

Открыв дверь 4, завешивают на держатели 18, находящиеся в загрузочно-выгрузочном отсеке 3, связки заготовок 19 обуви, включают электронагреватели 8 ёмкости 7 для воды в верхней камере 1. После этого дверь 4 герметизируют загрузочно-выгрузочный отсек. Одновременно с герметизацией двери 4 клапаны 11 I и соединяют верхнюю часть устройства, состоящего из верхней камеры 1, загрузочного отсека 3 с вакуумным насосом 6 и вакуумированной ёмкостью 9, а клапан 14 напуска воздуха в нижнюю камеру

открывают. В результате возникшей разности давлений в верхней части устройства и нижней камере 2 поршень-крышка 5 по направляющим 20 с заготовками верха обуви 19 перемещается вверх до упора в загрузочный торец верхней рабочей камеры и герметизирует ее. Происходит дальнейшее вакуумирование верхней камеры до момента закипания воды в ёмкости 7, после чего отсекают клапанами 11 и 15 верхнюю камеру I от насоса 6 и 20 вакуумированной ёмкости 9. Выдерживают заготовки обуви в паровой среде, увлажняя их. В это время открывают дверь 4 и ия держатели 18 крышки-поршня 5 навешивают следующие заготовки обуви. После заданного времени увлажнения загрузочно-выгрузочный отсек 3 с имеющимися уже там заготовками герметизируют дверью 4 и включают клапан 13 напуска воздуха в верхнюю камеру I, а нижнюю камеру 2 соединяют клапанами 12, 16 с вакуумным насосом 6. Далее цикл повторяется для нижней камеры.

Новизна конструкторского решения защищена патентом РФ № 2414832 «Устройство для увлажнения заготовок верха обуви с регулируемым объёмом рабочей камеры» [119].

6.3. Методология создания способов интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви

6.3.1. Методология и пример создания способов интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви с применением перфорированных колодок

Согласно вышеизложенной методологии (п. 5.5) использование метода функционирования технических систем позволяет разрабатывать новые способы интенсифицированной гигротермической обработки.

Анализ, полученных в соответствии с положениями метода функционирования технических систем, выражений обобщённых критериальных зависимостей интенсивностей увлажнения, влажно-тепловой фиксации, сушки, влажно-тепловой обработки (5.12–5.21) позволил сделать вывод о том, что для повышения качества и интенсивности обработки в условиях вакуума, при постоянном значении критерия подобия $\pi_i = idem = const$ (условие подо-

бия технического состояния подсистем), необходимо менять значения каких-либо параметров или их комплексов, например, коэффициента диффузионного сопротивления μ :

$$\mu = \frac{d \cdot m \cdot V_{M.K.} \cdot T_K \cdot C_K^{3,5} \cdot \rho \cdot C_{ПО} \cdot Q_T \cdot D \cdot \Phi_{П.С} \cdot Q_{П}}{I \cdot T_H^{0,5} \cdot P_K \cdot C_B \cdot R_{ПО} \cdot V_K^{1,33} \cdot P_H^4 \cdot \tau} \cdot 0,69. \quad (6.9)$$

Существенное понижения его значения при подаче пара на бахтармянную сторону заготовок с 5,35 до 3,2 [100] происходит при использовании перфорированных пуансонов или колодок. Заготовки вместе с перфорированной колодкой герметизировались сверху воздухонепроницаемой плёнкой и подвергались вакуумированию для обеспечения эвакуации воздуха из внутренней полости обуви и понижения давления внутри нее. Вакуумирование полости заканчивалось при полном прилегании полиэтиленовой плёнки к верху обуви и колодке. После этого внутренняя полость колодки соединялась с парогенератором, обеспечивающим подачу влажного насыщенного пара с $t=70-80$ °С. Процесс влагонасыщения заканчивался при появлении капель влаги на лицевой поверхности верха. Сушку обуви производили перегретым паром с $t=100$ °С, чередуя подачу пара и вакуумирование внутренней полости обуви (циклически). Затем внутренняя полость обуви соединялась с окружающей средой, плёнка снималась, обувь выдерживалась на колодке до ее полного остывания.

Новизна предложенного технического решения защищена авторским свидетельством СССР № 1521446 «Способ обработки обуви» [13] и патентом РФ № 2203600 «Способ обработки обуви» [114].

6.3.2. Методология и пример создания способа интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви с применением вакуума и давления

Согласно вышеизложенной методологии (п. 5.5) использование метода функционирования технических систем позволяет совершенствовать способы интенсифицированной гигротермической обработки.

Анализ, полученных в соответствии с положениями метода функционирования технических систем, выражения обобщённой критериальной зависимости полной деформации влажно тепловой фиксации (5.15) позволил сделать вывод о том, что для повышения качества обработки в условиях вакуума, при постоянном значении критерия подобия $\pi_i = idem = const$ (условие подобия технического состояния подсистем), необходимо менять значения каких-либо параметров или их комплексов, например, усилия формования F_ϕ за счёт связанного с ним перепада давлений ΔP рабочих сред: вакуума изнутри колодки и повышенного давления воздуха, действующего снаружи на заготовку.

$$F_\phi = \frac{\Delta P \cdot \mu \cdot V_K \cdot C_K^{0,5} \cdot Q_\Pi \cdot \Delta_{Полн}}{d \cdot P_\Pi \cdot T_K \cdot \phi_{П.С.} \cdot \tau \cdot T_H} \cdot 0,11. \quad (6.9)$$

Для повышения качества формования вытяжка заготовки, установленной на перфорированной колодке, производилась параллельно с созданием давления на поверхность заготовки с воздухонепроницаемой плёнкой выше атмосферного давления, по меньшей мере, в 1,5-2 раза, а дополнительное формование от пневмоцилиндра производилось с давлением до 0,25-0,3 МПа, т.е. в 2,5-3 раза выше атмосферного.

Вакуумирование и циклическая сушка заготовок производилась перегретым паром с $T=100^\circ\text{C}$ параллельно с созданием давления на поверхность заготовок с воздухонепроницаемой плёнкой в герметичной камере до 0,15-0,2 МПа, т.е. в 1,5-2 раза выше атмосферного.

Использование предлагаемого способа гигротермической фиксации заготовок верха обуви заменяет три единицы оборудования: для предварительного формования, увлажнения и сушки.

Новизна предложенного технического решения защищена авторским свидетельством СССР № 2349238 «Способ гигротермической фиксации заготовок верха обуви» [117].

6.3.3. Методология и пример создания способа интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви с циклическим приложением вакуума и давления

Согласно вышеизложенной методологии (п. 5.5) использование метода функционирования технических систем позволяет совершенствовать способы интенсифицированной гигротермической обработки [76].

Анализ, полученного в соответствии с положениями метода подобия функционирования технических систем, выражения обобщённой критериальной зависимости интенсивности при сушке на перфорированной колодке (5.18) позволил сделать вывод о том, что для повышения интенсивности обработки в условиях вакуума, при постоянном значении критерия подобия $\pi_i = idem = const$ (условие подобия технического состояния подсистем), необходимо менять значения каких-либо параметров или их комплексов, например, коэффициента цикличности [146] K :

$$K = \frac{I \cdot T_H^{0,5} \cdot P_K \cdot C_B \cdot R_{по} \cdot V_K^{1,33} \cdot P_H^4 \cdot \mu \cdot \tau}{d \cdot m \cdot V_{м.к.} \cdot T_K \cdot C_K^{3,5} \cdot \rho \cdot C_{по} \cdot Q_T \cdot D \cdot \varphi_{п.с} \cdot Q_{п.с}} \cdot 2,09. \quad (6.10)$$

Способ формования с циклическим приложением давления заготовок верха обуви включает в себя следующие операции:

1. Установка заготовки на перфорированную колодку.
2. Размещение колодки в рабочей камере с опорой на шток пневмоцилиндра.
3. Герметизация заготовки с колодкой воздухонепроницаемой плёнкой. Вакуумирование внутренней полости колодки до давления 0,01–0,02 МПа для предварительной стабилизации формы.
5. Увлажнение влажным насыщенным паром, подаваемым во внутреннюю полость перфорированной колодки в течение 4 минут.
6. Вытяжка заготовки колодкой, установленной на штоке пневмоцилиндра с усилием 200 Н.
7. Выдержка заготовки в нагруженном состоянии до конца всего цикла обработки.

8. Вакуумирование внутренней полости колодки до давления 0,02 МПа для предварительной стабилизации формы.

9. Вакуумная сушка заготовки при температуре 60 °С с внутренней полости колодки до подъёма давления в ней до 0,06 МПа с одновременным созданием давления паровоздушной среды сверху на заготовку до 0,15 МПа.

10. Выдержка в течение 1 минуты с целью предварительной стабилизации формы заготовки.

11. Повторное вакуумирование внутренней полости колодки до давления 0,02 МПа для предварительной стабилизации формы.

12. Вакуумная сушка заготовки при температуре 65 °С с внутренней полости колодки до подъёма давления в ней до 0,04 МПа с одновременным созданием давления паровоздушной среды сверху на заготовку до 0,2 МПа.

13. Выдержка в течение 1 минуты с целью предварительной стабилизации формы заготовки.

14. Третье вакуумирование внутренней полости колодки до давления 0,02 МПа.

15. Вакуумная сушка заготовки при температуре 70 °С с внутренней полости колодки до подъёма давления в ней до 0,03 МПа с одновременным созданием давления паровоздушной среды сверху на заготовку до 0,25 МПа.

16. Выдержка в течение 1 минуты с целью предварительной стабилизации формы заготовки.

17. Снижение давления паровоздушной среды в верхней части заготовки до атмосферного с одновременным подъёмом давления во внутренней полости колодки до атмосферного.

18. Выгрузка заготовки с колодкой из камеры.

Использование предлагаемого способа формования давлением заготовок верха обуви позволило объединить операции увлажнения, формования, сушки, проводя их параллельно-последовательным способом в одной рабочей камере. Повышение качества формования обеспечивается циклическим воздействием температурой и давлением паровоздушной среды на лицевую и бахтармянную поверхности заготовок, при котором значения остаточных деформаций доходят до 90–95 % полной деформации.

Новизна предложенного технического решения защищена патентом РФ № 2445907 «Способ формования давлением заготовок верха обуви» [120].

6.4. Подсистема обеспечения технического состояния оборудования для интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви на этапе его эксплуатации

6.4.1. Методология и пример создания способа регулирования параметров интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви

По аналогии с методологией, приведённой в разделе 5.5, были реализованы принципы создания способа регулирования параметров интенсифицированной гигротермической обработкой заготовок верха обуви с использованием объединённых критериев интенсивности процессов (табл. 5.5). Выразив из соответствующего выражения для определения π_{Ti} отношение:

$$\frac{T_K}{P_K} = \frac{\pi_{Ti} \cdot T_H \cdot D \cdot \tau \cdot \sqrt{\rho}}{P_H^{1,5}}, \quad (6.11)$$

определялось его численное значение для каждого из процессов при интенсифицированной гигротермической обработке с использованием приведённых в таблице 5.5 численных значений критериев интенсивности.

Для регулирования параметров рабочей среды - пара использовались датчики температуры T и давления P , связанные с ЭВМ, где их показания сравнивались с заданной зависимостью $P=f(T)$ для состояния насыщенного пара при давлении ниже атмосферного. В случае рассогласования этих показателей, сигнал поступал на электромагнитный золотник управления, через который подаётся порция воды в парогенератор, расположенный в нижней части рабочей камеры, до наступления согласования между показателями T и P при увлажнении. При сушке рост температуры опережает рост давления и порция воды не требуется, поэтому поддерживался задаваемый уровень температуры получаемого сухого пара.

Устройство содержит загрузочный отсек 1 с герметично закрывающейся крышкой 24, герметичную камеру 17, отделённую от загрузочного отсека 1 жёстко закреплённой перфорированной перегородкой 20, сквозь которую свободно проходит шток 13 с надетой на него пружины 19 и соединённый с поршнем 14, расположенным внутри цилиндра 16, установленного в герметичной камере 17, перфорированную колодку 21 с заготовкой 22, надетую на шток 13 и сверху укрытую воздухонепроницаемой плёнкой 23, края которой закреплены на основании загрузочного отсека 1, ёмкость 15 с водой и встроенными в неё электронагревателями 12, вакуумный насос 6, вакуумную ёмкость 2, аккумулятор воздуха 7 и систему управления 4. Система управления 4 включает в себя клапан отсечки 10 герметичной камеры 17 от вакуумного насоса 6, клапан 18 напуска воздуха в герметичную камеру 17, клапан 11 отсечки герметичной камеры 17 от вакуумной ёмкости 2, клапан 8 отсечки вакуумной ёмкости 2 от вакуумного насоса 6, клапан 5, распределяющий откачиваемый воздух вакуумным насосом 6, в загрузочный отсек 1 и в аккумулятор воздуха 7, клапан отсечки 3 аккумулятора воздуха 7 от цилиндра 16, от загрузочного отсека 1, клапан отсечки 9 аккумулятора воздуха 7 от цилиндра 16.

В исходном положении загрузочный отсек 1 закрыт крышкой 24, в герметичной камере 17 на неподвижной перфорированной перегородке 20 установлена одетая на шток 13 перфорированная колодка 21 с заготовкой 22, накрытая воздухонепроницаемой плёнкой 23. Электронагреватели 12, расположенные в ёмкости 15 с водой, включены. Вакуумный насос 6 соединён через клапан 8 с вакуумированной ёмкостью 2, а через клапан 5 – с аккумулятором воздуха 7. Герметичная камера 17 отсечена через клапан 10 от вакуумного насоса 6, и клапан 11 от вакуумированной ёмкости 2, клапан 9 отсекает цилиндр 16 от аккумулятора воздуха 7. Клапан напуска воздуха 18 в герметичную камеру 17 закрыт.

Узел автоматического регулирования, состоящий из датчиков температуры $t^{\circ}\text{C}$ – 25 и давления p – 26, находящихся в нижней камере 17, связанных через ЭВМ и блок преобразования с электромагнитным золотником управления 27, который по мере необходимости обеспечивает подачу воды.

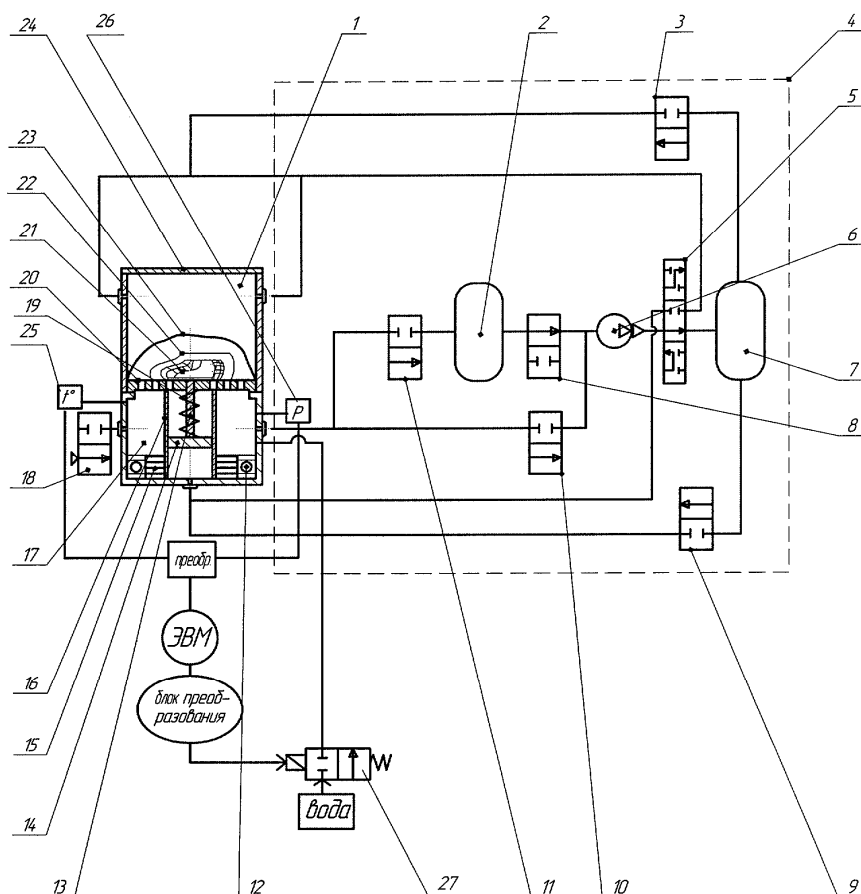


Рис. 6.6. Принципиальная схема устройства для гигротермической фиксации заготовок верха обуви с регулируемыми параметрами рабочей среды

Устройство работает следующим образом: открыв крышку 24, закрепляют перфорированную колодку 21, с заготовкой 22 на штоке 13, и накрывают воздухонепроницаемой плёнкой 23. Края плёнки закрепляют на основании загрузочного отсека 1, включают электронагреватели 12 в ёмкости 15 для воды в герметичной камере 17. После этого герметично закрывают крышку 24. Клапан 8, отсекает вакуумную ёмкость 2 от вакуумного насоса 6, клапан 10 соединяет герметичную камеру 17 с вакуумным насосом 6, клапан 11 с вакуумной ёмкостью 2. При достижении степени разрежения в герметичной камере 17 равной 0,02 мПа и температуры нагрева воды в ёмкости 15 до 60 °С начинает образовываться влажный пар, который в течение 2-х минут производит увлажнение заготовки 22 на перфорированной колодке 21 изнутри. Вакуумный насос 6, создавая разрежение в герметичной камере 17 через клапан 5 направляет откачиваемый воздух в цилиндр 16, тем самым приподнимается колодка 21 с заготовкой 22 надета на шток 13, в этом слу-

чае клапан 5 срабатывает одновременно с клапаном 9, через который аккумулятор воздуха усиливает давление в цилиндре 16, затем, фиксируя давление в цилиндре 16 клапан 9 отсекает аккумулятор воздуха 7 от цилиндра 16, а клапан 5 одновременно с клапаном 3 направляют воздух из аккумулятора воздуха 7 и от вакуумного насоса 6 в загрузочный отсек 1. Созданное давление в загрузочном отсеке 1 способствует фиксации воздухонепроницаемой плёнки 23 на заготовке 22. Под действием давления в цилиндре 16, шток 13 с перфорированной колодой поднимается вверх, обеспечивая тем максимальное облегание заготовки 22 на перфорированной колодке 21. Вакуумный насос 6 циклически (2-3 раза) отключается клапаном 10 от герметичной камеры 17 и присоединяется клапаном 8 к вакуумированной ёмкости 3, создавая в ней пониженное давление, а затем через 1-2 минуты вновь вакуумирует герметичную камеру 17, производя сушку изнутри паром, перегретым в ёмкости 15 по мере повышения давления в герметичной камере 17. В конце цикла через клапан 18 напускают воздух в герметичную камеру 17, заготовка остывает, после чего её через дверцу 24 извлекают из загрузочного отсека [89].

Новизна предложенного технического решения защищена патентом РФ № 2411888 «Устройство для гигротермической фиксации заготовок верха обуви с регулируемыми параметрами рабочей среды»[118].

6.4.2. Методология и пример создания способа управления интенсифицированной гигротермической обработкой заготовок верха обуви

По аналогии с методологией, приведённой в разделе 5, были реализованы принципы создания способа управления интенсифицированной гигротермической обработкой заготовок верха обуви с использованием объединённых критериев эффективности процессов (табл. 5.5).

Известно [64], что для достижения требуемых технологией изготовления обуви показателей физико-механических свойств предварительно вакуумированных кож кроме согласования показателей температуры и давления в зависимости от толщины кож необходимо регулировать и время обработки. Так, для кож хромового дубления толщиной 1-1,2 мм требуется 4 минуты, для кож повышенной толщины и 2-х слойных систем материалов –

6 минут. Причём, в зависимости от цели проводимого гигротермического воздействия – повышения формуемости кож или формо-устойчивости готовых изделий требуется изменять в лучшую сторону или условный модуль упругости материала, или величину остаточной деформации, а наилучшие их значения после вакуумирования и последующей гигротермической обработки приходится на различные значения времени обработки в интервале от 2 до 8 минут. Поэтому, в зависимости от цели обработки, требуется выдерживать не только требуемые параметры процессов, но и назначать время обработки с учётом превалирования тех или иных показателей, в совокупности определяющих процессы и изделия обработки, как системы с заданными свойствами.

Для этого, используя метод подобия функционирования технических систем, сопоставлялись рассчитанное по аналогу значение обобщённого критерия подобия – $\prod_{i=1}^k \pi_i$ функционирования систем «технология-продукция», устанавливающего функциональную связь между показателями физико-механических свойств материала-аналога, и параметрами его обработки и значение обобщённого критерия подобия $\prod_{i=1}^k \pi_i^1$, рассчитанного для другого исследуемого материала, отличного по своим физико-механическим свойствам от материала-аналога, но с рекомендуемым составом параметров обработки, и в случае неравенства рассчитанных значений критериев подобия, подбирались другие параметры обработки исследуемого материала до выполнения равенства $\prod_{i=1}^k \pi_i = \prod_{i=1}^k \pi_i^1$ [121].

Формирование критериев подобия функционирования, например, процесса увлажнения выполнялось в несколько этапов.

Из условия независимости размерностей (в единой системе измерений) формировался комплекс независимых параметров. Причём количество независимых параметров должно быть равно числу основных единиц измерения СИ. Принимались в качестве независимых параметров (табл. 6. 1) начальная температура T_n , начальное давление в камере P_n , время воздействия – τ , плотность паровоздушной среды – ρ .

Таблица 6.1 – Наименование и размерность параметров для определения качества увлажнения

№	Параметр	Обозначение	Размерность	Показатели степени размерностей в единицах СИ				Заданное значение	Независимые параметры по размерностям
				М	Т	Л	Q		
1	Влажность паровоздушной среды	$\varphi_{п.с}$	кг/кг	0	0	0	0	0,97	
2	Время увлажнения	τ	с	0	1	0	0	360	да
3	Температура начальная	T_H	К	0	0	0	1	323	да
4	Температура конечная	T_K	К	0	0	0	1	332	
5	Масса заготовок	m_3	кг	1	0	0	0	$6,5 \cdot 10^{-3}$	
6	Толщина кожи хромового дубления	d	м	0	0	1	0	$2,35 \cdot 10^{-3}$	
7	Объём микрокапилляров	$V_{м.к.}$	м ³	0	0	3	0	$\backslash 0,257 \cdot 10^{-3}$	
8	Паропроницаемость	$Q_{п}$	кг/(м ² с)	1	-1	-2	0	$107,73 \cdot 10^3$	
9	Удельная теплоёмкость кожи	C_K	м ² /(с ² К)	0	-2	2	-1	$1,61 \cdot 10^3$	
10	Конечный модуль упругости	E_K	кг/(с ² м)	1	-2	-1	0	$22 \cdot 10^6$	
11	Начальное давление в камере	P_H	кг/(с ² м)	1	-2	-1	0	$20 \cdot 10^3$	да
12	Объём камеры	$V_{к.}$	м ³	0	0	3	0	$9 \cdot 10^{-2}$	
13	Коэффициент диффузии	D	м ² /с		-1	2		$0,58 \cdot 10^{-4}$	
14	Плотность среды	ρ	кг/м ³	1	0	-3	0	$26 \cdot 10^{-2}$	да
15	Удельная теплота парообразования	$R_{по}$	м ² /с ²	0	-2	2	0	$480 \cdot 10^3$	
16	Количество теплоты	Q_m		1	-2	2	0	2050	
17	Конечное давление в камере	P_K	кг/(с ² м)	1	-2	-1	0	$50 \cdot 10^3$	
18	Коэффициент диффузионного сопротивления	μ	-	0	0	0	0	3,2	

Функциональная зависимость, получена для выходного параметра с использованием метода нулевых размерностей, конечного модуля упругости E_K , соответствующего гигротермическому процессу увлажнения от ряда определяющих его состояние параметров, имеет вид:

$$E_K = f(d, m_3, V_{M.K}, Q_{II}, C_K, \mu, \varphi_{П.С}, T_H, T_K, P_H, P_K, \tau, Q_T, V_K, D, \rho, C_{ПО}, R_{ПО}).$$

Для получения частных и обобщённых критериальных зависимостей определялись численные значения частных критериев подобия π_i , приведённые в таблице 6.1.

Значения частных π -критериев при увлажнении приведены ниже:

$$\begin{aligned} & \textbf{Увлажнение} \\ \pi(d) &= d / (t_H^0 \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^1 \cdot \rho^{-0,5}) = 1,0 \cdot 10^{-8} \\ \pi(m_3) &= m_3 / (t_H^0 \cdot P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-0,5}) = 2,51 \cdot 10^{-17} \\ \pi(V_{MK}) &= V_{MK} / (t_H^0 \cdot P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}) = 2,58 \cdot 10^{-19} \\ \pi(E_K) &= E_K / (t_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 1100 \\ \pi(E_K) &= E_K / (t_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 29 \\ \pi(Q_{II}) &= Q_{II} / (t_H^0 \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^0 \cdot \rho^{0,5}) = 1493,94 \\ \pi(C_K) &= C_K / (t_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 6,76 \\ \pi(\mu) &= \mu / (t_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 3,2 \\ \pi(\varphi_{П.С}) &= \varphi_{П.С} / (t_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 0,97 \\ \pi(t_K) &= t_K / (t_H^1 \cdot P_H^0 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 1,02 \\ \pi(P_K) &= P_K / (t_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^0) = 2 \\ \pi(D) &= D / (t_H^0 \cdot P_H^{0,5} \cdot \tau^{-1} \cdot \rho^{-0,5}) = 7,26 \cdot 10^{-5} \\ \pi(C_B) &= C_B / (t_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 8,04 \\ \pi(R_{ПО}) &= R_{ПО} / (t_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 2015,52 \\ \pi(C_{ПО}) &= C_{ПО} / (t_H^0 \cdot P_H^1 \cdot \tau^0 \cdot \rho^{-1}) = 0,02 \\ \pi(V_K) &= V_K / (t_H^0 \cdot P_H^{1,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}) = 9,04 \cdot 10^{-17} \\ \pi(Q_T) &= Q_T / (t_H^0 \cdot P_H^{2,5} \cdot \tau^3 \cdot \rho^{-1,5}) = 1,02 \cdot 10^{-16} \\ \pi(I) &= I / (t_H^0 \cdot P_H^0 \cdot \tau^{-1} \cdot \rho^{-1}) = 5,67 \cdot 10^{-21} \end{aligned}$$

Для того чтобы более эффективно использовать выведенные критерии подобия, необходимо выполнить ряд операций, обеспечивающих разделение параметров по разным критериям подобия и объединение их по физической значимости. Для получения π_{Ky} при увлажнении объединялись критерии $\pi_{Q_{II}}$, π_{C_K} , π_{μ} , π_d , π_{m_3} , π_{E_K} .

В результате произведённых действий было получено численное значение:

$$\begin{aligned} \pi_{Ky} &= \frac{d}{m_3 \cdot E_K \cdot C_K \cdot Q_{II} \cdot \mu} \cdot \frac{P_H^{3,5} \cdot \tau^2}{T_H \cdot \rho^{0,5}} = \\ &= \frac{2,35 \cdot 10^{-3} \cdot (20 \cdot 10^3)^{3,5} \cdot 360^2}{6,5 \cdot 10^{-3} \cdot 22 \cdot 10^6 \cdot 108 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^3 \cdot 3,2 \cdot 323 \cdot 26 \cdot 10^{-2}} = \frac{10492720}{205590} = 50,7 \end{aligned}$$

Для образца кожи хромового дубления отличного от образца – аналога по толщине: $0,95 \cdot 10^{-3}$ м против $2,35 \cdot 10^{-3}$ м и массе $0,8 \cdot 10^{-4}$ кг против $0,65 \cdot 10^{-3}$ кг, время обработки определим, используя полученный π_{Ky} :

$$50,7 = \frac{0,97 \cdot 10^{-3} \cdot (20 \cdot 10^3)^{3,5} \cdot \tau^2}{0,8 \cdot 10^{-4} \cdot 22 \cdot 10^6 \cdot 108 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^3 \cdot 3,2 \cdot 323 \cdot 26 \cdot 10^{-2}}$$

$$\tau = 222 \text{ с}$$

То есть время обработки образца меньшей толщины и массы уменьшено в 1,62 раза, что способствует снижению энергопотребления на этой операции во столько же раз.

На предложенное техническое решение подана заявка на предполагаемое изобретение «Способ управления интенсифицированной гигротермической обработкой кожевенных материалов».

6.5. Подсистема обеспечения технического состояния оборудования для интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви на этапе диагностики

6.5.1. Методология и пример создания способа определения относительной влажности кожевенно-обувных заготовок

Используя методологию, приведённую в разделе 5.5, были реализованы принципы создания способа определения относительной влажности кожевенно-обувных заготовок на основе сформированной функциональной зависимости объёма влаги, сконденсированной в микрокапиллярах кожевенно-обувных заготовок [64] от их исходных параметров и показателей процесса гигротермической обработки. Получив критериальное выражение подобия реального и предусмотренного технологией изготовления обуви процессов, с помощью специального программного обеспечения рассчитывались критерии подобия для этих процессов, а затем измерялись косвенные диагностические параметры реального процесса, например, давление и температура рабочей среды и по критериальному выражению определялось значение иско-

мого объёма влаги, сконденсированной в микрокапиллярах и с помощью калибровочного графика переводилось в проценты относительной влажности кожевенно-обувных заготовок.

При формировании функциональной зависимости относительной влажности кожевенно-обувных заготовок при интенсифицированной гигротермической обработке в вакууме в качестве исходных параметров – показателей физико-механических свойств рассматривались:

- 1) объём микрокапилляров;
- 2) удельная теплоёмкость кожи;
- 3) коэффициент диффузионного сопротивления.

Показателями процесса интенсифицированной гигротермической обработки в вакууме являются параметры, характеризующие:

- 1) состояние рабочей среды – температура, давление, плотность, удельная теплоёмкость;
- 2) характер движения рабочей среды – скорость, длина свободного пробега молекул в вакууме, время;
- 3) условия получения пара в вакууме – удельная теплоёмкость воды, удельная теплота парообразования, количество теплоты, объём камеры.

Использование способа определения относительной влажности кожевенно-обувных заготовок позволит гарантированно получать требуемое технологией изготовления обуви ее значение в зависимости от вида интенсифицированного гигротермического воздействия (увлажнения, сушки, влажно-тепловой обработки) в вакууме в процессе обработки, что позволит исключить применяемое для этих целей специальное оборудование.

Пример определения относительной влажности кожевенно-обувных заготовок, исходя из определения объёма сконденсированной влаги в микрокапиллярах, приводится ниже [84].

Формируется функциональная зависимость выходного параметра от определяющих ее состояние параметров, наименование которых приводится в таблице 6.2.

$$V_{C.B.} = f(V_{M.K.}, C_K, \mu, t_H, t_K, P_H, P_K, \rho, C_{П}, \bar{u}, \lambda, C_B, R_{ПО}, \tau, V_K, Q_T). \quad (6.1)$$

Таблица 6.2 – Наименование и размерность параметров для определения объема сконденсированной влаги в микрокапиллярах

№	Параметр	Обозначение	Единица измерения	Показатели степени размерностей в единицах СИ				Заданное значение	Независимые параметры по размерностям
				М	Т	Л	Q		
1	Объем микрокапилляров	$V_{\text{м.к.}}$	$\text{м}^3/\text{кг}$	1	0	3	0	$20,7 \cdot 10^{-3}$	
2	Удельная теплоёмкость кожи	$C_{\text{к}}$	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	0	-2	2	-1	$1,61 \cdot 10^3$	да
3	Коэффициент диффузионного сопротивления	μ		0	0	0	0	3,2	
4	Температура начальная	$t_{\text{н}}$	К	0	0	0	1	323	
5	Температура конечная	$t_{\text{к}}$	К	0	0	0	1	331	да
6	Начальное давление в камере	$P_{\text{н}}$	Па	1	-2	-1	0	$10 \cdot 10^3$	
7	Конечное давление в камере	$P_{\text{к}}$	Па	1	-2	-1	0	$40 \cdot 10^3$	да
8	Плотность пара	ρ	$\text{кг}/\text{м}^3$	1	0	-3	0	$13 \cdot 10^{-2}$	
9	Удельная теплоёмкость пара	$C_{\text{п}}$	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	0	-2	2	-1	$2,018 \cdot 10^3$	
10	Скорость движения молекул	$\bar{u}$	$\text{м}/\text{с}$	0	-1	1	0	$6,24 \cdot 10^2$	
11	Длина свободного пробега молекул	λ	м	0	0	1	0	$0,37 \cdot 10^{-6}$	
12	Время увлажнения	τ	сек	0	1	0	0	240	
13	Удельная теплоёмкость воды	$C_{\text{в}}$	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	0	-2	2	-1	$4,19 \cdot 10^3$	
14	Удельная теплота парообразования	$R_{\text{по}}$	$\text{Дж}/\text{кг}$	0	-2	2	0	$2382 \cdot 10^3$	
15	Объем камеры	$V_{\text{к}}$	м^3	0	0	3	0	$3 \cdot 10^{-2}$	да
16	Количество теплоты	$Q_{\text{т}}$	Дж	1	-3	2	0	1170	
17	Объем сконденсированной влаги в микрокапиллярах	$V_{\text{с. в.}}$	м^3	0	0	3	0	$0,17 \cdot 10^{-3}$	

Определяются критерии функционального подобия для частных критериев подобия π_i с использованием соответствующего программного обеспечения:

$$\begin{aligned}
 \pi(V_{M.K.}) &= V_{M.K.} / (C_K^{*1} \cdot t_H^{*1} \cdot P_H^{-1} \cdot V_K^{*0}) = 1,70 \cdot 10^{-4} \\
 \pi(\mu) &= \mu / (C_K^{*0} \cdot t_H^{*0} \cdot P_H^{*0} \cdot V_K^{*0}) = 3,2 \\
 \pi(t_K) &= t_K / (C_K^{*0} \cdot t_H^{*1} \cdot P_H^{*0} \cdot V_K^{*0}) = 1,024 \\
 \pi(P_K) &= P_K / (C_K^{*0} \cdot t_H^{*0} \cdot P_H^{*1} \cdot V_K^{-0,66}) = 41,429 \\
 \pi(p) &= p / (C_K^{-1} \cdot t_H^{-1} \cdot P_H^{*1} \cdot V_K^{-0,66}) = 6,76039 \\
 \pi(C_\Pi) &= C_\Pi / (C_K^{*1} \cdot t_H^{*0} \cdot P_H^{*0} \cdot V_K^{*0}) = 1,25 \\
 \pi(\bar{u}) &= \bar{u} / (C_K^{*0,5} \cdot t_H^{*0,5} \cdot P_H^{*0} \cdot V_K^{*0}) = 0,85 \\
 \pi(\lambda) &= \lambda / (C_K^{*0} \cdot t_H^{*0} \cdot P_H^{*0} \cdot V_K^{*0,33}) = 1,19 \cdot 10^{-6} \\
 \pi(C_B) &= C_B / (C_K^{*1} \cdot t_H^{*0} \cdot P_H^{*0} \cdot V_K^{*0}) = 2,60 \\
 \pi(R_{\Pi O}) &= R_{\Pi O} / (C_K^{*1} \cdot t_H^{*0} \cdot P_H^{*0} \cdot V_K^{*0}) = 1479,50 \\
 \pi(\tau) &= \tau / (C_K^{-0,5} \cdot t_H^{-0,5} \cdot P_H^{*0} \cdot V_K^{*0,33}) = 556995,50 \\
 \pi(Q_T) &= Q_T / (C_K^{*0,5} \cdot t_H^{*0,5} \cdot P_H^{*1} \cdot V_K^{-1,33}) = 1,56 \cdot 10^{-5} \\
 \pi(V_{C.B.}) &= V_{C.B.} / (C_K^{*0} \cdot t_H^{*0} \cdot P_H^{*0} \cdot V_K^{*1}) = 5,66 \cdot 10^{-3}
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

Находится обобщённый критерий подобия $\prod_{i=1}^k \pi_i$:

$$\prod_{i=1}^k \pi_i = \frac{\pi_{V_{MK}} \cdot \pi_{t_K} \cdot \pi_\rho \cdot \pi_{C_\Pi} \cdot \pi_{\bar{u}} \cdot \pi_\lambda \cdot \pi_{C_B} \cdot \pi_{R_{\Pi O}} \cdot \pi_{Q_T} \cdot \pi_{V_{CB}}}{\pi_{P_K} \cdot \pi_\tau \cdot \pi_\mu}, i = \overline{1, k}, \text{при } k = 13 \tag{6.13}$$

Определяется обобщённое критериальное выражение подобия функционирования для объёма влаги, сконденсированной в микрокапиллярах, которое имеет вид:

$$V_{CB} = \frac{V_{MK} \cdot t_K \cdot \rho \cdot C_\Pi \cdot \bar{u} \cdot \lambda \cdot C_B \cdot R_{\Pi O} \cdot Q_T \cdot V_K^{2,336}}{\mu \cdot P_K \cdot \tau \cdot C_K^{4,5} \cdot t_H^{2,5}} \cdot \prod_{i=1}^k \pi_i \tag{6.4}$$

В результате подсчёта получены следующие значения объёма сконденсированной влаги в одном капилляре при различных конечных значениях давления P , и температуры t .

$$V_{CB} = 4,93 \cdot 10^{-23} \text{ м}^3 (P_K = 25 \cdot 10^3 \text{ Па, и } t_K = 328 \text{ К});$$

$$V_{CB} = 2,07 \cdot 10^{-23} \text{ м}^3 (P_K = 30 \cdot 10^3, \text{ и } t_K = 330 \text{ К});$$

$$V_{CB} = 1,04 \cdot 10^{-23} \text{ м}^3 (P_K = 40 \cdot 10^3, \text{ и } t_K = 331 \text{ К}).$$

Используя калибровочный график (рис. 6.7), полученный теоретически, определим относительную влажность равную соответственно 8, 12, 25 %.

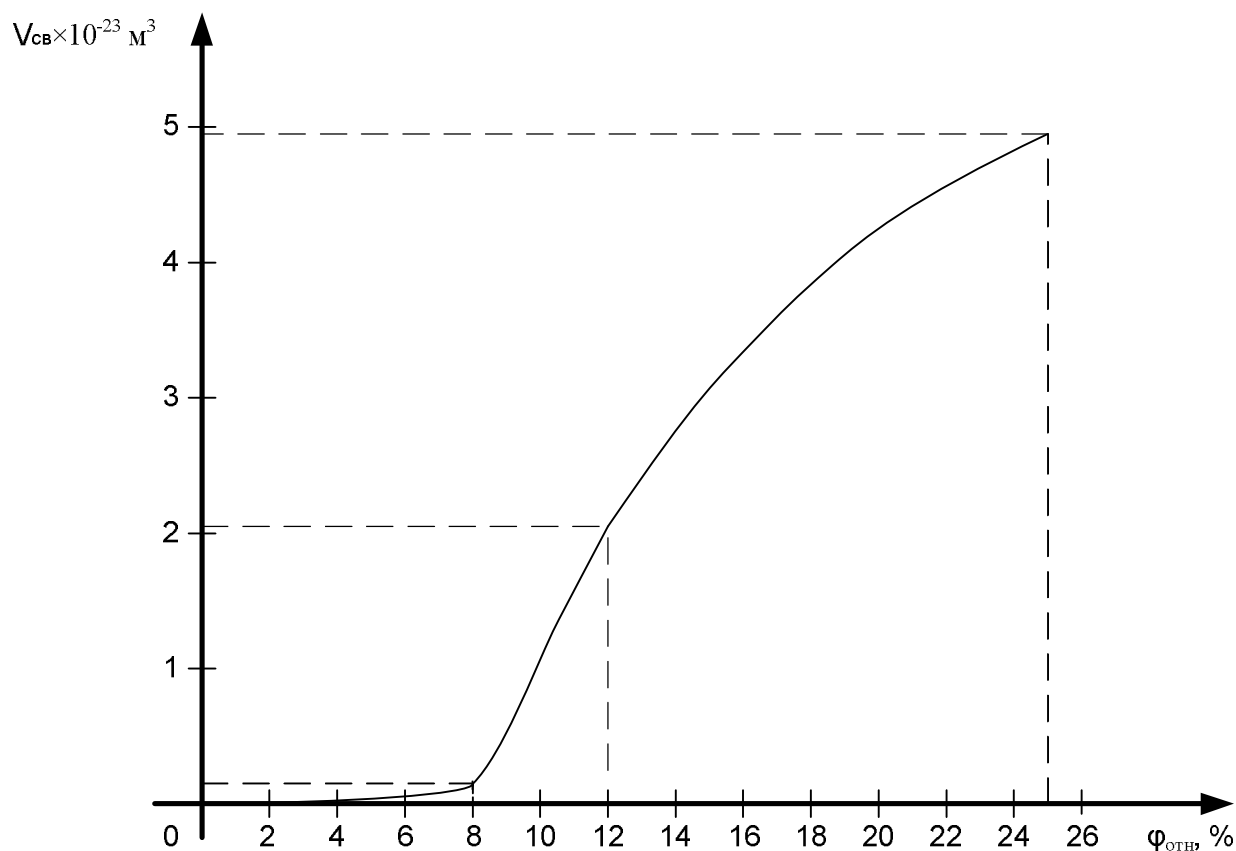


Рис. 6.7. Калибровочный график

Новизна предложенного технического решения защищена патентом РФ № 2447822 «Способ определения относительной влажности кожевенно-обувных заготовок» [121].

Таким образом, для оборудования, используемого при интенсифицированной гигротермической обработке натуральных кожевенно-обувных материалов на различных этапах его жизненного цикла, разработаны математические модели, приведённые в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Система математических моделей принятия технических решений на различных этапах жизненного цикла оборудования для ИГО

Этап ЖЦ	Техническая задача	Базовый критерий	Математическая модель выходной характеристики процесса (оборудования)	Результат
1	2	3	4	5
Проектирование	Разработка оборудования для ИГО			
	а) при увлажнении	I	$I = \frac{d \cdot m \cdot V_{M.K.} \cdot T_K \cdot C_K^{3,5} \cdot \rho \cdot C_{ПО} \cdot Q_T \cdot D \cdot \varphi_{П.С} \cdot Q_{П}}{T_H^{0,5} \cdot P_K \cdot C_B \cdot R_{ПО} \cdot V_K^{1,33} \cdot P_H^4 \cdot \mu \cdot \tau} \cdot 0,69$	А.с. №1099944
	б) при фиксации	$\Delta_{Полн}$	$\Delta_{Полн} = \frac{d \cdot P_{П} \cdot T_K \cdot \varphi_{П.С} \cdot \tau \cdot F_{\Phi} \cdot T_H}{\Delta P \cdot \mu \cdot V_K \cdot C_K^{0,5} \cdot Q_{П}} \cdot 0,11$	Пат. №2312573
а) <u>оборудования</u>	в) при сушке	I	$I = \frac{d \cdot m \cdot V_{M.K.} \cdot T_K \cdot C_K^{3,5} \cdot \rho \cdot C_{ПО} \cdot Q_T \cdot D \cdot \varphi_{П.С} \cdot Q_{П} \cdot K}{T_H^{0,5} \cdot P_K \cdot C_B \cdot R_{ПО} \cdot V_K^{1,33} \cdot P_H^4 \cdot \mu \cdot \tau} \cdot 2,09$	Пат. №2312574
	г) при ВТО	I	$I = \frac{d \cdot m \cdot V_{M.K.} \cdot T_K \cdot C_K^{3,5} \cdot \rho \cdot C_{ПО} \cdot Q_T \cdot D \cdot \varphi_{П.С} \cdot Q_{П}}{T_H^{0,5} \cdot P_K \cdot C_B \cdot R_{ПО} \cdot V_K^{1,33} \cdot P_H^4 \cdot \mu \cdot \tau} \cdot 0,39$	Пат. №2414832
	д) при совмещении операций	$\pi_{\tau \Sigma}$	$\pi_{\tau \Sigma} = \frac{T_n}{P_n^{0,5} \cdot D \cdot I \cdot \mu} \cdot \frac{P_K}{T_K \cdot \tau^2 \cdot \rho^{1,5}} = 1,78 \cdot 10^{-26}$	Пат. №2312573, №2411888
	а) интенсификация ИГО	μ	$\mu = \frac{d \cdot m \cdot V_{M.K.} \cdot T_K \cdot C_K^{3,5} \cdot \rho \cdot C_{ПО} \cdot Q_T \cdot D \cdot \varphi_{П.С} \cdot Q_{П}}{I \cdot T_H^{0,5} \cdot P_K \cdot C_B \cdot R_{ПО} \cdot V_K^{1,33} \cdot P_H^4 \cdot \tau} \cdot 0,69$	Пат. №1521446
б) <u>способов</u>	б) расширение технологических возможностей	F_{Φ}	$F_{\Phi} = \frac{\Delta P \cdot \mu \cdot V_K \cdot C_K^{0,5} \cdot Q_{П} \cdot \Delta_{Полн}}{d \cdot P_{П} \cdot T_K \cdot \varphi_{П.С} \cdot \tau \cdot T_H} \cdot 0,11$	Пат. №2203600
	в) циклодинамического формования	K	$K = \frac{I \cdot T_H^{0,5} \cdot P_K \cdot C_B \cdot R_{ПО} \cdot V_K^{1,33} \cdot P_H^4 \cdot \mu \cdot \tau}{d \cdot m \cdot V_{M.K.} \cdot T_K \cdot C_K^{3,5} \cdot \rho \cdot C_{ПО} \cdot Q_T \cdot D \cdot \varphi_{П.С} \cdot Q_{П}} \cdot 2,09$	Пат. №2445907
	г) гигротермической фиксации	ΔP	$\Delta P = \frac{d \cdot P_{П} \cdot T_K \cdot \varphi_{П.С} \cdot \tau \cdot F_{\Phi} \cdot T_H}{\Delta_{Полн} \cdot \mu \cdot V_K \cdot C_K^{0,5} \cdot Q_{П}} \cdot 0,11$	Пат. №2349258

Окончание табл. 6.3

1	2	3	4	5
Модерни- зация	а) снижение энерго- потребления	Q_T	$Q_T = \frac{T_H^{0,5} \cdot P_K \cdot C_B \cdot R_{ПО} \cdot V_K^{1,33} \cdot P_H^4 \cdot \mu \cdot \tau}{d \cdot m \cdot V_{М.К.} \cdot T_K \cdot C_K^{3,5} \cdot \rho \cdot C_{ПО} \cdot D \cdot \varphi_{П.С} \cdot Q_{П}} \cdot 0,69$	№1391589 №1715294
Эксплуата- ция	а) способы управления; б) средства управления		$\frac{T_K}{P_K} = \frac{\pi \cdot T_H \cdot D \cdot \tau \cdot \sqrt{\rho}}{P_H^{1,5}}$ $V_K = \frac{\pi \cdot C_{П.О.} \cdot Q_T \cdot \rho}{P_H^2}$	№2411888 №2414832
Диагности- ка	определение относи- тельной влажности		$V_{М.К.} = \frac{T_H^{0,5} \cdot P_K \cdot C_B \cdot R_{ПО} \cdot V_K^{1,33} \cdot P_H^4 \cdot \mu \cdot \tau}{d \cdot m \cdot T_K \cdot C_K^{3,5} \cdot \rho \cdot C_{ПО} \cdot Q_T \cdot D \cdot \varphi_{П.С} \cdot Q_{П}} \cdot 0,69$	№2447822

6.6. Разработка алгоритма для системы автоматического регулирования процессом ИГО

Для обеспечения автоматического регулирования режимами ИГО при выполнении соответствующих операций согласно требованиям технологического процесса изготовления обуви разработана система управления, алгоритм которой приведён на рисунке 6.8.

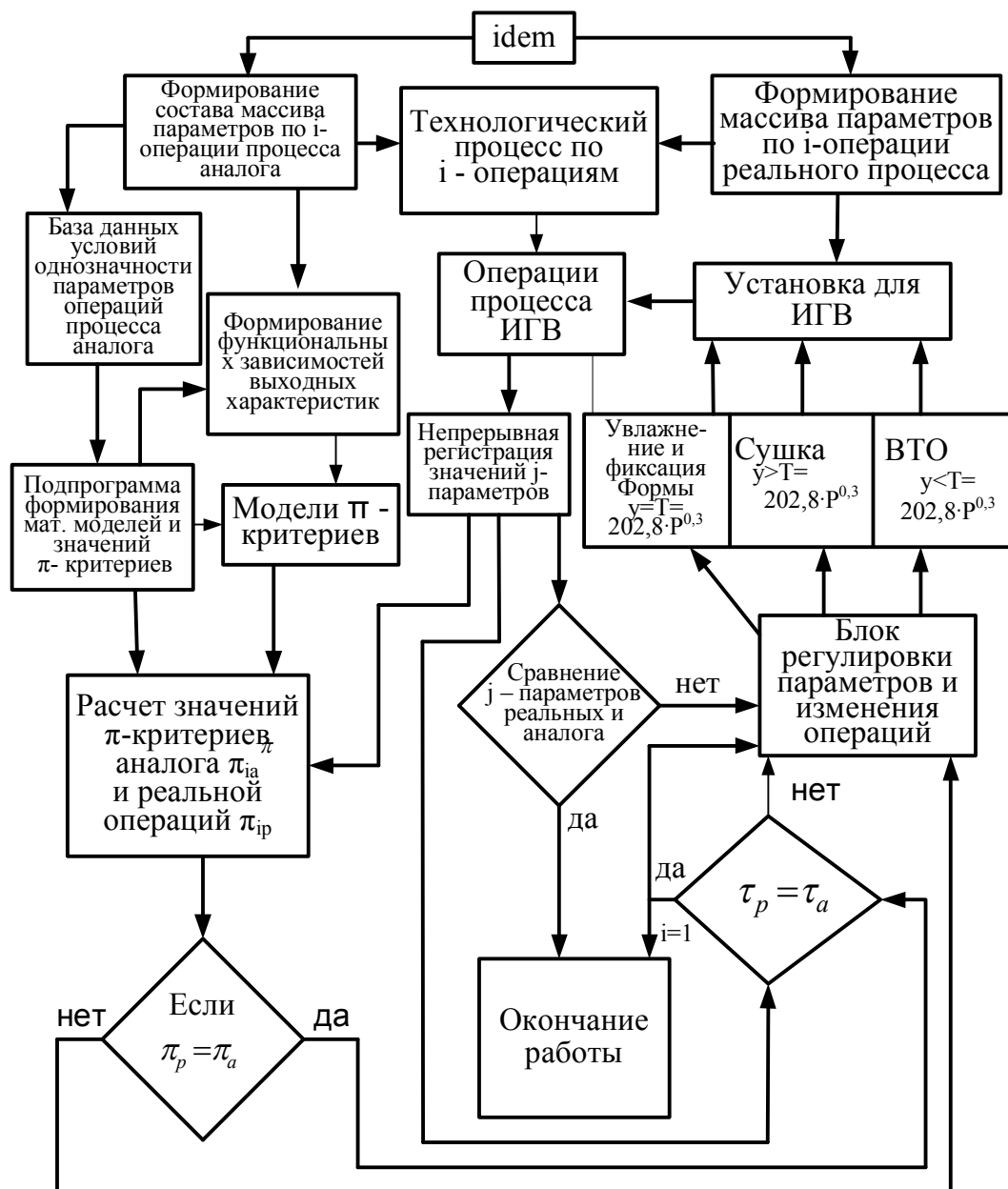


Рис. 6.8. Схема алгоритма системы управления технологическими процессами ИГО

В зависимости от выбранного технологического процесса ИГО в систему управления вводятся два состава массива – для процесса аналога и реального процесса, в которые входят параметры, определяющие физико-механические свойства материала, параметры рабочей среды и установки. Количество параметров в обоих массивах должно быть равно. Массив аналога должен быть составлен на основе условий однозначности, которые позволяют определить значение параметров, соответствующих определённому виду процессов ИГО.

На основании программы для создания математических моделей и значений π - критериев формируются функциональные зависимости выходных характеристик процессов ИГО от определяющих её состояние параметров.

На основании этих данных подпрограмма рассчитывает значения π критериев аналога π_{ia} и реального процесса π_{ip} , если полученные значения совпадают, то режимы, соответствующие процессу-аналогу, применяются и для реального процесса. В этом случае сигнал поступает на блок сравнения, где после выхода параметров T и P реального процесса на кривую заданную уравнением $y = 202,8 \cdot x^{0,3}$ при увлажнении и соответствующую максимальному насыщению влагой паровоздушной среды, находящейся в принятом объёме, соотношение этих параметров поддерживается постоянным в течение времени увлажнения.

При сушке поддерживается соотношение температуры и давления в заданных пределах в течение времени сушки согласно неравенству $y > 202,8 \cdot x^{0,3}$.

При влажно-тепловой обработке поддерживается соотношение температуры и давления в заданных пределах в течение времени влажно-тепловой обработки согласно неравенству $y < 202,8 \cdot x^{0,3}$.

В том случае, когда значения π критериев не равны, то подаётся сигнал на блок регулирования параметров, который изменяет температуру обработки и соответствующее ей давление до значений, обеспечивающих равенство π_{ia} и π_{ip} . После чего процесс выполняется, как описано выше.

Таким образом, при использовании предложенного алгоритма будет обеспечено автоматическое регулирование параметров процессов ИГО заготовок

верха обуви в универсальной вакуумной установке при переходе от выполнения одной операции к другой в соответствии с типовой технологией изготовления обуви. На информационно-управляющую оболочку опытной установки для гигротермической обработки кож получено свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617180 [138].

ВЫВОДЫ

1. Получены математические модели принятия конструкторских и технологических решений на этапах проектирования и эксплуатации гигротермического оборудования.

2. Разработаны способы и устройства для интенсифицированной гигротермической обработки натуральных кожевенно-обувных материалов.

3. На основе теоретических и экспериментальных исследований получено 4 авторских свидетельств СССР, 8 патентов РФ, 1 свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ на способы, конструкторские, решения, направленные на обеспечение технического состояния гигротермического оборудования.

Общие выводы об основных результатах работы

1. На основе анализа современных технологий и оборудования для интенсифицированной гигротермической обработки (ИГО) натуральных кожевенно-обувных материалов с использованием вакуума установлено, что при интенсификации процессов ИГО не учитываются возможности направленных тепло- и влажопотоков, воздействующих на микрокапиллярную структуру с бахтармянной стороны кож, и возможное при этом совмещение ряда технологических операций на соответствующем унифицированном оборудовании, а в теоретических исследованиях практически отсутствуют математические модели, объединяю-

щие параметры процессов ИГО с показателями физико-механических свойств обрабатываемых материалов и оборудования.

2. Выдвинута, теоретически обоснована и экспериментально доказана гипотеза о существовании при низких парциальном давлении и температуре избирательной конденсации пара в системе микрокапилляров кожи в условиях вакуума, способствующей интенсификации сорбции влаги в микрокапиллярах, образованию новых связей в структуре кожи, не разрушаемых при повторных воздействиях тепла и влаги, фиксации и сохранению её формы в новом зафиксированном состоянии при последующих интенсифицированных методах обработки.

3. Сформулирована и обоснована концепция исследования и разработки унифицированного оборудования для ресурсосберегающих технологий интенсифицированной гигротермической обработки натуральных кожевенно-обувных материалов в условиях вакуума, основанная на принципах системности теоретических положений гипотезы, а также математических моделей детерминированных и стохастических взаимосвязей параметров технологических процессов, капиллярной структуры кожи, оборудования.

4. Разработаны математические модели, раскрывающие теоретические положения диссертации, в том числе:

- об избирательной конденсации пара в системе микрокапилляров кожи в условиях вакуума;
- о характере распределения микрокапилляров в структуре натуральных кожевенных материалов;
- о системности связей показателей физико-механических свойств обрабатываемых материалов с параметрами технологических режимов и оборудования, учитывающих их стохастическое подобие функционирования.

5. Экспериментально установлено, что предварительное вакуумирование исключает влияние изменения степени гидрофильности поверхности структурных элементов кожи на сорбцию влаги в микрокапиллярах, что обеспечивает равномерный привес влаги в кожах различного характера выработки.

6. Установлено рациональное время вакуумно-сорбционного увлажнения, равное 6-ти минутам, при котором показатели формуемости кож и формоустойчивости максимальны.

7. Экспериментально подтверждены положения выдвинутой гипотезы о влиянии микрокапиллярной влаги при использовании вакуума на изменение физико-механических показателей кож хромового дубления: показатели формуемости повышаются в 1,5–2 раза, показатели формоустойчивости – в 1,3 раза. При этом время обработки с применением вакуума уменьшается более чем в 5 раз, по сравнению с традиционным способом.

8. Установлены возможность и эффективность применения вакуума для всех операций цикла ИГО при последовательно-параллельном совмещении их в унифицированном оборудовании с применением перфорированных колодок, обеспечивающие сокращение времени обработки более чем в 2,9 раза по сравнению с обработкой в специализированном оборудовании с использованием вакуума.

9. Концепция разработки оборудования реализована при создании новых способов и устройств, на которые получены 4 авторских свидетельства СССР и 8 патентов Российской Федерации, положенных в основу новых энергосберегающих технологий интенсифицированной гигротермической обработки.

10. Разработаны и внедрены в производство и учебный процесс рекомендации по использованию новых технологий и технических решений унифицированного оборудования для интенсифицированного гигротермического воздействия с применением вакуума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев В.А., Кудрин Б.И. Закономерности построения, функционирования и развития технических систем. – Томск: ТГТУ, 1996. – 100 с.
2. Адигамов К.А., Ларина Л.В. Вакуумно-сорбционное увлажнение заготовок верха обуви: монография; Южно-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2000. – 95 с.
3. Адигамов К.А., Сапронов Ю.Г., Ларина Л.В. Исследование вакуумных способов увлажнения и сушки обуви и разработка исходных требований на проектирование малогабаритной универсальной установки для увлажнения и сушки заготовок обуви в вакууме // ВНИИЦ. Сб. реф. НИР и ОКР. Сер. лёгк. пром-сть. – М., 1990. – № 7. – С. 26.
4. Адигезалов Л.И. Увлажнение, сушка и влажно-тепловая обработка в обувном производстве. – М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1983. – 136 с.
5. Акулова Т.Е., Таганцева Т.Ф. Интенсификация гигротермических процессов в обувном производстве // Обувная промышленность. – 1981. – № 2. – С. 62–64.
6. Алабовский А.Н., Константинов С.М. Теплотехника / под ред. С.М. Константинова. – Киев: Высш. шк. Головное изд-во, 1986. – 255 с.
7. Алабужев П.М. Основы теории подобия, размерности и моделирования. – Тула, 1988.
8. Алабужев П.М. Теория подобия и размерностей. Моделирование. – М.: Высш. шк., 1968.
9. Альтшулер М.А. К теории капиллярной пропитки смачивающими жидкостями пористых материалов с тупиковыми капиллярами // Коллоидный журнал. – 1961. – Т. 23, № 6. – С. 646–651.
10. А.с. 1090044 СССР, МКИЗ А 43 D 11/14. Устройство для вакуумного увлажнения заготовок обуви / К.А. Адигамов, Б.И. Сурмилов, Л.В. Ларина, В.А. Сторчевой, С.В. Романихин, С.В. Стрелков; заявитель и патентообладатель Шахтинский технологический институт бытового обслуживания. № 3558044/28-12; заявл. 28.02.1983; опубл. 30.06.1984, Бюл. № 24.

11. А.с. 1391589 СССР, МКИЗ А 43 D 11/14. Устройство для вакуумного увлажнения заготовок обуви / К.А. Адигамов, Б.И. Сурмилов, Л.В. Ларина, В.В. Ширяев, Л.Н. Янкин; заявитель и патентообладатель Шахтинский технологический институт бытового обслуживания. № 4105629/28-12; заявл. 02.06.1986; опубл. 30.04.1988, Бюл. № 16.
12. А.с. 1391589 СССР, МКИЗ А 43 D 11/14. Устройство для вакуумного увлажнения заготовок обуви / Л.В. Ларина, К.М. Зурабян, К.А. Адигамов, В.И. Сурмилов, В.В. Ширяев; заявитель и патентообладатель Шахтинский технологический институт бытового обслуживания: № 4765202/12; заявл. 05.12.1989; опубл. 10.05.2003, Бюл. № 13.
13. А.с. 15221446 СССР, МКИЗ А 43 D 11/14. Способ обработки обуви / Л.В. Ларина, В.В. Бескоровайный; заявитель и патентообладатель Шахтинский технологический институт бытового обслуживания: № 4072085/30-12; заявл. 02.06.1986; опубл. 15.11.1989, Бюл. № 42.
14. А.с. № 1715294 СССР МКИ5 А43Д11/14. Устройство для вакуумного увлажнения заготовок обуви / Л.В. Ларина, К.М. Зурабян, К.А. Адигамов, Б.И. Сурмилов, В.В. Ширяев /СССР/. – № 4765202/12-14; заявл. 05.12.89; опубл. в бюл. № 8 // Открытия. Изобретения. – 1992. – № 8.
15. Белоброва Л.В., Зыбин А.Ю., Метелкин А.И. Формоустойчивость юфти хромцирконий-синтанового метода дубления // Кожевенно-обувная промышленность. – 1978. – № 9. – С. 49–50.
16. Бескоровайный В.В., Ларина Л.В. Технические средства предприятий сервиса: учеб. пособие для вузов. – М.: Академия, 2003. – 304 с.
17. Браславский А.Н., Браславский В.А. Капиллярные процессы в обувных материалах. – М.: Лёгкая индустрия, 1979. – 163 с.
18. Брунауэр С. Адсорбция газов и паров. – М.: ИЛ, 1948. – 362 с.
19. Будак Б.Н., Самарский А.А., Тихонов А.Н. Сборник задач по математической физике. – М.: Наука, 1972. – 688 с.
20. Веников В.А. Теория подобия и моделирования: учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1984. – 439 с.

21. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: учеб. для вузов / А.И. Якушев [и др.]. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. – 201 с.
22. Виноградов В.А., Грушанский С.И. Эффективность сложных систем. Динамические модели. – М.: Машиностроение, 1987.
23. Влияние вида сырья и технологии производства кожи на технологические свойства кож для верха // Известия высших учебных заведений. Технология лёгкой промышленности. – М., 1987. – 15 с.
24. Влияние влаги и поровой структуры некоторых коллоидных капиллярно-пористых материалов на их деформационные и прочностные свойства: отчёт о НИР / М.Ф. Казанский. – Киев: Киевский технологический институт лёгкой промышленности, 1973. – 173 с.
25. Воронов Н.Ф., Удавенко Т.В. Методика испытания формовочных свойств мягких искусственных кож для верха обуви // Экспресс-информация. Обувная и кожгалантерейная промышленность. – М., 1985. – № I. – С. 1–9.
26. ГОСТ 8.417–2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. Принят 6.11.2002 г. – М.: Изд-во стандартов, 2003.
27. ГОСТ 9135–2004 Обувь. Метод определения общей и остаточной деформации подноски и задника. Введ. 01.07.2006.
28. ГОСТ 938.11–69 Кожа. Метод испытания на растяжение. Введ. 01.01.1970.
29. ГОСТ 938.12–70 Обувь. Метод подготовки образцов к физико-механическим испытаниям. Введ. 01.01.71.
30. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. – М.: Мир, 1984. – 306 с.
31. Грибанов А.А. Моделирование процессов пропитки капиллярно-пористых тел при использовании импульсно-вакуумной интенсификации; Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова. – Барнаул, e-mail: diread@mail.ru
32. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. – М.: Высш. шк., 1973. – 296 с.

33. Гухман А.А., Зайцев А.А. Обобщённый анализ. – М.: Факториал, 1998. – 304 с.
34. Демидов А.В., Макаров А.Г. Моделирование деформационных процессов текстильных полимерных материалов // Вестник СПГУТД. – 2010. – № 2. – С. 40–44.
35. Долинский Б.Ф. Обработка результатов измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 192 с.
36. Дунин-Барковский, И.В. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 210 с.
37. Ермаков С.М., Мелос В.Б. Математический эксперимент с моделями сложных стохастических систем. – СПб.: Изд. ГУ, 1993.
38. Замарашкин К.Н. Определение деформационных свойств кожи с помощью фрактальной размерности // Кожевенно-обувная промышленность. – 2008. – № 3. – С. 43–45.
39. Замарашкин К.Н. Анализ и разработка методов автоматических координатных измерений изображений небесных объектов, полученных на носителях с высоким разрешением: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.01.01 / Замарашкин Кирилл Николаевич. – СПб., 1995. – 178 с.
40. Зельдина А.Е. Исследование пористости кожи / А.Е. Зельдина, Е.Ф. Кондратьков, К.М. Зурабян [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология лёгкой промышленности. – 1973. – № 3. – С. 60–64.
41. Зурабян К.М. Влияние параметров увлажнения в вакууме на физико-механические свойства кож хромового дубления / К.М. Зурабян, Т.Е. Акулова, Л.В. Ларина [и др.] // Известия вузов. Технология лёгкой промышленности. – 1989. – № 6. – С. 34–36.
42. Зурабян К.М., Краснов Б.Я., Бернштейн М.М. Материаловедение изделий из кожи. – М.: Легпромиздат, 1988. – 416 с.
43. Зурабян К.М. Пропитка кож хромового дубления водяными дисперсиями полимеров. – М.: Лёгкая индустрия, 1974. – 192 с.

44. Зыбин А.Ю. Двухосное растяжение материалов для верха обуви. – М.: Лёгкая индустрия, 1974. – 119 с.
45. Зыбин Ю.П. Технология изделий из кожи: учебник для студентов вузов лёгкой пром-сти / Ю.П. Зыбин, Д.И. Анохин, М.Ю. Гвоздев [и др.]. – М.: Лёгкая индустрия, 1975. – 464 с.
46. Информационно-управляющая оболочка опытной установки для гигротермической обработки кожи / Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617180 / Л.В. Ларина, И.В. Тарара, В.В. Смирнов, заявитель и патентообладатель ЮРГУЭС. № 2010 614416. Заявл. 20. 07 2010. Опубл. 27.10.2010.
47. Исследование формуемости материалов и систем материалов для верха обуви и формоустойчивости готовой обуви. Выдача рекомендаций ЦНИИ кожевенно-обувной промышленности: сборник рефератов НИР и ОКР. – М.: Лёгкая промышленность, 1984. – № 4.
48. Кавказов Ю.Л. Взаимодействие кожи с влагой. – М.: Гизлегпром, 1952. – 318 с.
49. Кавказов Ю.Л. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви. – М.: Лёгкая индустрия, 1973. – 272 с.
50. Казанский М.Ф., Луцык Р.В., Мельникова А.Ф. Влияние влаги разных форм связи на деформационные свойства полимерных материалов // Известия высших учебных заведений Технология лёгкой промышленности. – 1977. – № 3. – С. 124–126.
51. Калита А.Н., Акимова Е.В. О потребительских и технологических требованиях к системам материалов заготовки верха образца-эталона обуви // Кожевенно-обувная промышленность. – 1987. – № 2. – С. 52–53.
52. – Калита А.Н. Справочник обувщика. Технология. – М.: Легпромбытиздат, 1989. – 416 с.
53. Карташов Г.Д., Козлов В.М. Экспериментальное подтверждение принципа инвариантности в теории надёжности // Изв. АН СССР, 1976. – №5.-С. 103-107.
54. Кирпичев М.В. Теория подобия. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. – 94 с.

55. Киселёв А.В., Яшин Л.И. Газоадсорбционная хроматография. – М.: Наука, 1967. – 261 с.
56. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1970. – 720 с.
57. Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
58. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 543 с.
59. Кутын В.А., Зельдина А.Е., Набоков В.С. Исследование структурных изменений дермы сорбционными методами // КОП. – 1972. – № 1. – С. 37–41.
60. Кутянин Г.И. Исследование физико-механических свойств кожи и обуви. – М.: Гизлегпром, 1956. – 196 с.
61. Ларина Л.В. Влияние параметров увлажнения в вакууме на физико-механические свойства кож хромового дубления повышенной толщины и систем материалов / Л.В. Ларина, К.М. Зурабян [и др.] // Известия вузов. Технология лёгкой промышленности. – 1990. – № 5. – С. 75–80.
62. Ларина Л.В. Исследование влияния режимов увлажнения в вакууме на физико-механические свойства полимерных материалов // Прогрессивная техника и технология, системы управления и автоматизированного проектирования в текстильной и лёгкой промышленности: Межвуз. сб. науч. трудов по материалам науч.-техн. конф. – М., 1989. – С. 64–67.
63. Ларина Л.В. Исследование процесса вакуумно-сорбционного увлажнения кож хромового метода дубления // Совершенствование технологических процессов изготовления одежды и обуви: сб. науч. трудов. – Шахты: ШТИБО, 1994. – Вып. 5. – С. 85–87.
64. Ларина Л.В. Исследование процесса и разработка установки для вакуумно-сорбционного увлажнения деталей верха обуви: дис. ... канд. техн. наук / Ларина Людмила Васильевна. – М., 1991. – 135 с.
65. Ларина Л.В., Адигамов К.А. [и др.] К вопросу выбора рациональной схемы установки для увлажнения в вакууме обувных заготовок // Известия вузов. Технология лёгкой промышленности. – 1989. – № 2. – С. 47–50.

66. Ларина Л.В. К вопросу создания вакуумного энергосберегающего гигротермического оборудования // Современные наукоёмкие технологии и перспективные материалы текстильной и лёгкой промышленности (Прогресс-2012): сборник материалов Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 2. – Иваново: ИГТА, 2012. – С. 163–164.
67. Ларина Л.В., Загоскин А.А. [и др.] К вопросу создания универсального устройства для гигротермической фиксации заготовок верха обуви // Бытовая техника, технология и технологическое оборудование предприятий сервиса и машиностроения: Юбилейный междунар. сб. науч. трудов / под ред. А.В. Кожемяченко. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2007. – С. 32–33.
68. Ларина Л.В. К выбору режимов формирования обувных заготовок вакуумом // Совершенствование техники и технологии сервиса: сб. науч. трудов. – Шахты: ДГАС, 1999. – Вып. 32. – С. 110–111.
69. Ларина Л.В., Першин В.А. [и др.] Критерии оценки эффективности процессов интенсифицированной гигротермической обработки (ИГО) на этапах формирования требуемого качества изделий [Электронный ресурс] / Л.В. Ларина // Инженерный Вестник Дона. – 2012. – № 3. – URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/latest/n3y2012/896/>
70. Ларина Л.В., Сапронов Ю.Г. Малогабаритная комбинированная универсальная вакуумная установка для увлажнения и сушки обувных заготовок // Радиотехника, оборудование и технологии сервиса: сб. науч. трудов. – Шахты: ДГАС, 1997. – Вып. 27 (Часть 2). – С. 99–101.
71. Ларина Л.В., Юрченко В.И. Математические модели процесса вакуумно-сорбционного увлажнения кож // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион Технические науки. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2011. – № 6. – С. 140–145.
72. Ларина Л.В., Першин В.А., Смирнов В.В. Математическое моделирование нанотехнологий в производстве обуви // Математическое и компьютерное моделирование естественнонаучных и социальных проблем: сб. статей 3 Междунар. науч.-техн. конф. молодых специалистов, аспирантов и студентов. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2009. – С. 107–111.

73. Ларина Л.В., Адигамов К.А. Математическое моделирование процесса вакуумно-сорбционного увлажнения заготовок обуви // Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы междунар. науч.-практ. конф. – Новочеркасск, 2001.
74. Ларина Л.В., Загоскин А.А. [и др.] Моделирование процесса вакуумно-сорбционного увлажнения // Современные инновационные технологии и оборудование: Всерос. науч.-техн. конф. / под общ. ред. чл.-корр. РАН В.П. Мешалкина. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – С. 141–143.
75. Ларина Л.В. Моделирование процесса вакуумно-сорбционного увлажнения кож // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион Технические науки. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2012. – № 1. – С. 129–132.
76. Ларина Л.В., Сорока В.А. Моделирование процесса циклодинамического формования заготовок верха обуви // Актуальные проблемы техники и технологии: сб. науч. трудов / редкол. Н.Н. Прокопенко [и др.]; ГОУ ВПО «Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса». – Шахты: Изд-во «ЮРГУЭС», 2011. – С. 62–65.
77. Ларина Л.В., Першин В.А. О стохастическом подобию функционирования системы «интенсифицированная гигротермическая обработка» кожевенно-обувных материалов [Электронный ресурс] // Инженерный Вестник Дона. – 2012. – № 4. – URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/latest/n3y2012/896/>
78. Ларина Л.В., Смирнов В.В., Першин В.А. Один из методов математического описания гигротермической обработки заготовок верха обуви // «Известия вузов. Сев.-Кавк. регион». – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2009. – № 1. – С. 123–127.
79. Ларина Л.В., Загоскин А.А. Определение оптимальных режимов вакуумно-сорбционного увлажнения заготовок верха обуви // Вестник всеукр. нац. ун-та им. В. Даля. – Луганск, 2007. – № 1 (107). – С. 261–263.
80. Ларина Л.В., Загоскин А.А. Определение оптимальных режимов вакуумно-сорбционного увлажнения // Бытовая техника, технология и технологическое оборудование предприятий сервиса и машиностроения: Юбилейный междунар. сб. науч. трудов / под ред. А.В. Кожемяченко. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2007. – С. 31–32.

81. Ларина Л.В., Першин В.А. [и др.] Проектирование оборудования для нанотехнологий в производстве обуви // Актуальные проблемы техники и технологии: сб. науч. трудов / редкол. Н.Н. Прокопенко [и др.]; ГОУ ВПО «Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса». – Шахты: Изд-во «ЮРГУЭС», 2009. – С. 16–19.
82. Ларина Л.В., Загоскин А.А. Пути повышения производительности оборудования для гигротермической обработки изделий из кожи // Проблемы машиностроения и технического обслуживания в сфере сервиса. Радиоэлектроника, телекоммуникации и информационные технологии: Межвузовский сб. науч. трудов / под ред. С.А. Кузнецова. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2006. – С. 13–15.
83. Ларина Л.В., Першин В.А., Смирнов В.В. Расчёт и проектирование гигротермического оборудования. Применение метода подобия функционирования технических систем // LAP LAMBERT Akademik. – 2012. – 68 с.
84. Ларина Л.В., Першин В.А. [и др.] Способ определения относительной влажности кожевенно-обувных заготовок // Актуальные проблемы техники и технологии: сб. науч. трудов / редкол. Н.Н. Прокопенко [и др.]; ГОУ ВПО «Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса». – Шахты: Изд-во «ЮРГУЭС», 2010. – С. 55–58.
85. Ларина Л.В. Установка для предварительного формования обувных заготовок с применением вакуума и давления // Вестник всеукр. нац. ун-та им. В. Даля. – Луганск, 2006. – № 10 (104). – С. 130–133.
86. Ларина Л.В., Булатов Е.Р. Установка для предварительного формования с применением вакуума и давления // Оборудование предприятий сервиса: теория и опыт внедрения: Межвузовский сб. науч. трудов / под ред. А.В. Кожемяченко. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2003. – С. 225–227.
87. Ларина Л.В. Установка для увлажнения заготовок верха обуви в вакууме // Материалы областной науч.-практ. конф.: Тезисы докл. – Ростов н/Д., 1984.
88. Ларина Л.В. Устройство для вакуумно-сорбционного увлажнения обувных заготовок // Автосервис, машины и агрегаты, механика: сб. науч. трудов. – Шахты: ДГАС. – 1996. – Вып. 20 (Часть 1). – С. 110–112.

89. Ларина Л.В., Узули В.Б. Устройство для предварительного формования обувных заготовок в вакууме // Применение математических методов в вопросах совершенствования техники и технологии лёгкой промышленности: сб. науч. трудов. – Шахты: ШТИБО, 1995. – Вып. 17.
90. Луцык Р.В. Моделирование взаимосвязи тепломассообменных и деформационно-релаксационных процессов, протекающих при сушке дисперсных материалов. – Киев: Киевский нац. ун-т технологий и дизайна.
91. Луцык Р.В., Хомяк Н.Е. [и др.] Влияние влаги на релаксационные процессы, происходящие в обувных материалах при формовании // Известия высших учебных заведений Технология лёгкой промышленности. – 1987. – № 2. – С. 59–63.
92. Луцык Р.В., Хомяк Н.Е. [и др.] Влияние влаги на релаксационные процессы, происходящие в обувных материалах при формовании // Известия высших учебных заведений Технология лёгкой промышленности. – 1987. – № 3. – С. 38–41.
93. Луцык Р.В., Ментковский Ю.Л. [и др.] Моделирование на ЭВМ процессов тепло- и массообмена при гигротермической обработке материалов лёгкой промышленности // Известия высших учебных заведений Технология лёгкой промышленности. – 1988. – № 3. – С. 19–23.
94. Луцык Р.В. Разработка методов изучения, анализ взаимосвязи и прогнозирование тепломассообменных и физико-механических свойств текстильных и кожевенно-обувных материалов: дис. ... докт. техн. наук / Луцык Р.В. – Киев, 1987.
95. Луцык Р.В., Ментковский Ю.Л. [и др.] Релаксация напряжений в полимерных материалах при их тепло- и массообмене со средой // Известия высших учебных заведений Технология лёгкой промышленности. – 1986. – № 4. – С. 57–60.
96. Луцык Р.В., Ментковский Ю.Л. Тепло- и массообмен при гигротермических процессах обработки материалов, применяемых в лёгкой промышленности

- // Известия высших учебных заведений Технология лёгкой промышленности. – 1986. – № 1. – С. 129–132.
97. Луцык Р.В., Ментковский Ю.Л. Тепло- и массообмен при гигротермических процессах обработки материалов, применяемых в лёгкой промышленности // Известия высших учебных заведений Технология лёгкой промышленности. – 1986. – № 2. – С. 100–102.
98. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергоиздат, 1963. – 471 с.
99. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высш. шк., 1982. – 224 с.
100. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
101. Лыков А.В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах. – М.: Гостехиздат, 1954. – 296 с.
102. Макаренко Е.Ф. Конвективная установка проходного типа для сушки и термофиксации обуви: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Макаренко Е.Ф. – Витебск, 2009. – 25 с.
103. Марк Д.А., Годен К. Мак. САДТ Метрология структурного анализа и проектирования. – М.: Метатехнология, 1993.
104. Макаров И.П. Дополнительные главы математического анализа: учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов. – М.: Просвещение, 1968. – 308 с.
105. Макарышева Т.Л. Определение формоустойчивости обувных дублированных текстильных материалов на приборе ШИК // Кожевенно-обувная промышленность. – 1984. – № I. – С. 29–30.
106. Ментковский Ю.Л., Луцык Р.В. [и др.] Моделирование тепломассообменных и деформационных процессов, протекающих при сушке материалов лёгкой промышленности // Известия высших учебных заведений Технология лёгкой промышленности. – 1988. – № 8. – С. 57–60.
107. Михайлов А.Н. Химия и физика коллагена кожного покрова. – М.: Лёгкая индустрия, 1980. – 232 с.

108. Михеева Е.Я. Современные методы оценки качества обуви и обувных материалов. – М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1984. – 248 с.
109. Михеева Е.Я. Справочник обувщика. Технология. – М.: Легпромбытиздат, 1989. – 416 с.
110. Надёжность и эффективность в технике: справочник. В 10 т. / редсовет.: В.С. Авдуевский (пред.) [и др.]. – М.: Машиностроение, 1987. – (в пер.) Т. 4. Методы подоби́я и надё́жность / под общ. ред. В.А. Мельникова, Н.А. Старцева. – 280 с.
111. Николаев Н.И. Диффузия в мембранах. – М.: Химия, 1980. – 232 с.
112. Ольшанский А.И., Макаренко Е.Ф. [и др.] Рациональные технологические режимы сушки пакетов материалов для верха обуви // Инженерно-физический журнал. – 2009. – Т. 82. – № 6. – С. 1075–1080.
113. Основы теории подоби́я и моделирования: сб. рекомендуемых терминов. – М.: Наука, 1987. – 20 с.
114. Способ обработки обуви: пат. 2203600 Рос. Федерация, МПК6 А 43 D 95/10 / Л.В. Ларина, В.В. Солоничев, Д.А. Солоничева; заявитель и патентообладатель ЮРГУЭС. № 2001106778/12; заявл. 13.03.2001; опубл. 10.05.2003, Бюл. № 13.
115. Устройство для гигротермической фиксации заготовок верха обуви: пат. 2312573 Рос. Федерация, МПК6 А 43 D 95/10 / Л.В. Ларина, Б.И. Сурмилов, А.А. Загоскин, А.А. Малый; заявитель и патентообладатель ЮРГУЭС. № 2006114205/12; заявл. 25.04.2006; опубл. 20.12.2007, Бюл. № 35.
116. Устройство для вакуумного увлажнения, формования и сушки заготовок верха обуви: пат. 2312574 Рос. Федерация МПК6, А 43 D 95/10 / Л.В. Ларина, Б.И. Сурмилов, А.А. Загоскин, А.А. Малый; заявитель и патентообладатель ЮРГУЭС. № 2006114206/12; заявл. 25.04.2006; опубл. 20.12.2007, Бюл. № 35.
117. Способ гигротермической фиксации заготовок верха обуви: пат. 2349238 Рос. Федерация, МПК6, А 43 D 95/10 / Л.В. Ларина, В.В. Смирнов; заявитель и патентообладатель ЮРГУЭС. № 200714334/12; заявл. 22.11.2007; опубл. 20.03.2009, Бюл. № 8.
118. Устройство для гигротермической фиксации заготовок верха обуви с регулируемыми параметрами рабочей среды: пат. 2411888 Рос. Федерация, МПК6 А

43 D 11/00 / Л.В. Ларина, В.В. Смирнов, В.А. Сухарникова, В.П. Плотников; заявитель и патентообладатель ЮРГУЭС. № 2009149165/12; заявл. 28.12.2009; опубл. 20.02.2011, Бюл. № 5.

119. Устройство для увлажнения заготовок верха обуви с регулируемым объёмом рабочей камеры: пат. 2414832 Рос. Федерация, МПК6 А 43 D 11/00 / Л.В. Ларина, В.В. Смирнов, Б.И. Сурмилов, В.А. Сорока, С.А. Тряпичкин; заявитель и патентообладатель ЮРГУЭС. № 2010116569/12; заявл. 26.04.2010; опубл. 27.03.2011, Бюл. № 9.

120. Способ формования давлением заготовок обуви: пат. 2445907 Рос. Федерация, МПК6 А 43 D 11/00 / Л.В. Ларина, В.А. Першин, В.А. Сорока, В.В. Смирнов; заявитель и патентообладатель ЮРГУЭС. № 2011100963/12; заявл. 12.01.2011; опубл. 27.03.2012, Бюл. № 9.

121. Способ определения относительной влажности кожевенно-обувных заготовок: пат. 2447822 Рос. Федерация, МПК6 А 43 D 11/10 / Л.В. Ларина, В.А. Першин, В.В. Смирнов, Ю.О. Джелиев; заявитель и патентообладатель ЮРГУЭС. № 2010125397/12; заявл. 21.06.2010; опубл. 20.04.2012, Бюл. № 11.

122. Першин В.А. Методология подобия функционирования технических систем: монография / под ред. д.т.н., проф. А.Н. Дровникова. – Новочеркасск: УПЦ «Набла» ЮРГТУ (НПИ); Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2004. – 227 с.

123. Першин В.А. Основы подобия функционирования системы «Техника-технология-продукция». – Новочеркасск: ЮРГТУ, 1996. – 120 с.

124. Полуэктова В.Д., Плотникова Л.Г., Лейнов Я.Н. Изучение формоустойчивости материалов для верха текстильной обуви // Совершенствование технологии производства обуви: сб. науч. трудов ПЩИКП. – М.: ВДИИТЭИлегпром, 1982. – С. 63–70.

125. Приказ № 853 Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 24.09.2009 г. «Стратегия развития лёгкой промышленности России на период до 2020 года».

126. Прохоров В.Т. Отечественное и зарубежное оборудование для изготовления и ремонта обуви, кожгалантереи: пособие. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2003. – 77 с.
127. Прохоров В.Т. Предпосылки создания новых, рекреация и реструктуризация бывших производств для изготовления изделий из кожи в ЮФО: монография. – Шахты: ЮРГУЭС, 2007. – 368 с.
128. Пушкин С.А. Оборудование обувного, кожгалантерейного и мехового производств: учеб. пособие. – Ростов н/Д.: Феникс, 2002. – 512 с.
129. Ратаутас А.С. Влияние увлажнения на эффективность процесса фиксации формы верха обуви // Автоматизация и механизация производственных процессов и управления: тезисы докл. конф. – Каунас, 1980. – 29–31 с.
130. Ратаутас А.С. Гигротермическая фиксация формы изделий из кожи // Известия высших учебных заведений Технология лёгкой промышленности. – 1974. – № 2. – С. 65–70.
131. Раяцкас В.Л. Практикум по технологии изделий из кожи: учебник для вузов. – М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1981. – 279 с.
132. Раяцкас В.Л. Технология изделий из кожи: учебник для вузов. – М.: Легпромбытиздат, 1988. – Ч. 2. – 317 с.
133. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.
134. Рохлин В.П. Исследование влияния отдельных технологических параметров на формуемость и статическую формоустойчивость верха обуви из натуральной кожи / В.П. Рохлин, А.Н. Копылова, Е.В. Акимова, Е.Я. Михеева // Исследования, направленные на экономное использование ресурсов в обувной промышленности: сб. науч. трудов; под ред. В.П. Рохлина. – М., 1983. – С. 3–10.
135. Рудобашта С.И. Массоперенос в системах с твёрдой фазой. – М.: Химия, 1980. – 250 с.
136. Сапронов А.Г., Тимченко В.И., Шаповалов В.А. Оптимизационные методики по энергосбережению и природоохранным мероприятиям на предприятиях

- лёгкой промышленности и сервиса: монография; Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса. – Шахты: ЮРГУЭС, 2000. – 70 с.
137. Сапронов А.Г., Шарапов В.А. Энергосбережение на предприятиях бытового обслуживания: учеб. пособие для вузов; под ред. А.Г. Сапронова; Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса. – Шахты: ЮРГУЭС, 1999. – 166 с.
138. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617180 «Информационно управляющая оболочка опытной установки для гигротермической обработки кожи» / Тарара И.В., Ларина Л.В., Смирнов В.В. / Заявлен 20 июля 2010 г. № заявки 2010614416, опублик. 27.10.2010 г.; заявитель и патентообладатель Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса.
139. Северцев Н.А., Шолкин В.Г., Ярыгин Г.А. Статистическая теория подобия. Надёжность технических систем. – М.: Наука, 1986. – 205 с.
140. Сингаевская Г.И. Функции в Excel. Решение практических задач. – М.: Вильямс, 2005. – 880 с.
141. Смирнов В.В. Исследование процесса вакуумно-сорбционного увлажнения методом подобия функционирования / В.В. Смирнов, Л.В. Ларина [и др.] // Актуальные проблемы техники и технологии: сб. науч. тр.: редкол.: Н.Н. Прокопенко [и др.]. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2008. – С. 142–144.
142. Смирнов В.В. Методы интенсификации процессов гигротермической обработки для придания материалам лёгкой промышленности свойств формоустойчивости [Электронный ресурс] / В.В. Смирнов, Л.В. Ларина [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – URL: <http://www.science-education.ru/>
143. Смирнов Н.Н., Ицкович А.А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. – М.: Транспорт, 1980. – 232 с.
144. Соколовский А.Р. К вопросу представления кожи как вязкоупругой фрактальной среды // Сибирский научный вестник РАЕН. Известия Новосибирского науч. центра «Ноосферные знания и технологии». – Новосибирск: НГАСУ. – 2003. – Вып. 6. – С. 204–207.

145. Соколовский А.Р. Применение теории вязкоупругих фрактальных сред для описания свойств кожи // Актуальные проблемы науки, техники и экономики производства изделий из кожи: сб. статей междунар. науч. конф. 4-5 ноября 2004 г. – Витебск: ВГТУ, 2004. – С. 121–123.
146. Сорока В.А., Ларина Л.В., Присяжнюк Ю.В. Особенности циклодинамического формования заготовок верха обуви // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки. – Новочеркасск: ЮРГТУ. – 2011. – № 4. – С. 136–137.
147. Страхов И.П. Химия и технология кожи и меха / И.П. Страхов, И.С. Шестакова [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Лёгкая индустрия, 1979. – 504 с.
148. Сурмилов Б.И., Ларина Л.В. Интенсификация процесса увлажнения в вакууме обувных заготовок // Известия вузов. Технология лёгкой промышленности. – 1986. – № 4. – С. 78–80.
149. Татарчук И.Р. Особенности формования носочной части заготовок беззатяжной специальной обуви / И.Р. Татарчук, А.А. Никитин [и др.] // Кожевенно-обувная промышленность. – 2009. – № 5. – С. 33–34.
150. Таубин М.Г., Вапник З.А. Гигротермическое оборудование обувного производства. – М.: Лёгкая индустрия, 1978. – 158 с.
151. Теория прогнозирования и принятия решений: учеб. пособие / под ред. С.А. Саркисяна. – М.: Высш. шк., 1977. – 201 с.
152. Типовая технология изготовления обуви с учётом механизации технологических процессов и использования новых материалов / КТБО МБОН РСФСР. – М., 1988. – 86 с.
153. Тихомиров В.Б. Планирование и проведение эксперимента (при проведении исследований в лёгкой и текстильной промышленности). – М.: Лёгкая индустрия, 1974. – 262 с.
154. Файбишенко М.А. Влияние различных факторов на формоустойчивость обуви // Кожевенно-обувная промышленность. – 1965. – № 9. – С. 27–33.
155. Фетисов В.Г., Мицик М.Ф., Медведев Д.В. Основы математического моделирования: учеб. пособие. – Шахты: ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2009. – 200 с.

156. Фукин В.А., Калита А.Н. Технология изделий из кожи: учебник для вузов. В 2 ч. – М.: Легпромбытиздат, 1988. – Ч. 1. – 272 с.
157. Функциональные ряды в теории нелинейных систем / К.А. Пупков, В.И. Капалин, А.С. Ющенко. – М.: Наука, 1976. – 448 с.
158. Фурашова С.Л. Методика исследования упругопластических свойств обувных материалов при двухосном растяжении / С.Л. Фурашова, В.Е. Горбачик, К.А. Загайгора [и др.] // В сб. Метрологическое обеспечение, стандартизация и сертификация в сфере услуг. – Шахты: ЮРГУЭС, 2006. – С. 24–25.
159. Филькин Г.В. Методы расчёта полей концентрации загрязняющих веществ, поступающих в водотоки со сточными водами: дис. ... канд. техн. наук / Филькин Г.В. – Новочеркасск, 1986. – 147 с.
160. Хартман У. Очарование нанотехнологий / пер. с нем. – М.: Бином Лаборатория знаний, 2008. – 173 с.
161. Худсон Д. Статистика для физиков. – М.: Мир, 1967. – 242 с.
162. Ценова Л.В. Машины и аппараты обувного производства: учебник. – М.: Высш. шк., 1991. – 318 с.
163. Цибизова Е.М. Системный подход к проблеме формоустойчивости обуви // Известия высших учебных заведений Технология лёгкой промышленности. – 1983. – 75 с.
164. Цобкалло Е.С., Туркина Н.Р. Электронно-микроскопическое исследование трансформации надмолекулярной структуры натуральной кожи // Дизайн, материалы, технология. – 2006. – № 1. – С. 28–31.
165. Чалых А.Е. Диффузия в полимерных системах. – М.: Химия, 1987. – 312 с.
166. Чертов А.Г. Международная система единиц измерения. – М.: Высш. шк., 1967.
167. Чесунов В.М. Оптимизация процессов сушки в лёгкой промышленности. – М.: Легпромбытиздат, 1985. – 112 с.
168. Шестакова И.С. [и др.] Новые данные о строении коллагена // Научные труды КТИЛП. – Киев, 1960. – № 16. – С. 3–7.

169. Шустов Ю.С. Разработка методов прогнозирования строения и свойств текстильных материалов с использованием теории подобия и анализа размерностей: дис. ... докт. техн. наук / Шустов Ю.С. – М.
170. Щербаков В.В. Формоустойчивость систем материалов для верха обуви / В.В. Щербаков, А.Н. Калита, Г.К. Рухадзе, В.А. Полищук // Кожевенно-обувная промышленность. – 1980. – № 12. – С. 19–21.
171. Яворский В.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1979. – 944 с.
172. Frechet M., Ann. Soc. Polon. Mat. (Cracow), 6(1927), 93.
173. Nicholson D., Petropoulos I.H. / I. Colloid. Interface Sci. – 1973. – 45. – № 3. – P. 459–466.
174. Gazor, H.R., Eyvani, A. Adsorption isotherms for red onion slices using empirical and neural network models // International Journal of Food Engineering. -2011. <https://www.scopus.com>.
175. Sladek K.I., Gililand E.R., Baddour R.T. // Ind. Eng. Chem. Fundam. – 1974. – № 2. – 13 p.
176. URL: <http://einzige.narod.ru/Honeywell.pdf> – Датчики давления «Honeywell».
177. URL: <http://energo.omniconf.ru>
178. URL: <http://www.chipfind.ru/datasheet/dallas/ds1820.htm> – Электронный компонент «DALLAS»
179. URL: <http://www.elcomag.ru/uploads/tdpdf/07304538.pdf> – Pressure Sensors «Gage and Differential/Unamplified Compensated»
180. URL: <http://www.electronshik.ru/item/26pcafa6d-f731742> – Каталог «Электронщик»
181. URL: <http://www.elin.ru/1-Wire/?topic=components2> – Цифровые термометры
182. URL: http://www.ph4s.ru/book_teplotehnika.html Теплотехника тепломассообмен
183. URL: <http://www.platan.ru/pdf/ec222.pdf> – Датчики давления «Honeywell»
184. URL: <http://www.vova1001.ru/00001705.htm> Наука и техника

- 185.URL: <http://ftp.elin.ru/pdf/1-Wire/DS18B20.pdf> – DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer
- 186.Weibull W., Ing.-Arch., 28(1959), 360.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Основные параметры датчика 26PSAFA6D

Максимальное рабочее давление, кПа	6.90
Выходное напряжение при максимальном давлении, В	0.017
Точность, % от макс	0.250
Термокомпенсация	есть
Напряжение питания, В	10.0
Измеряемая среда	сухой газ/вода
Тип датчика	дифференциальный
Тип выходного интерфейса	напряжение
Диапазон рабочих температур, °C	-40...85
Предельно допустимое давление, $P_{\text{предел}}$	20 PSI
Чувствительность, мВ/кПа	± 6.5
Время реакции, мс	1.0
Входное сопротивление, кОм	7.5
Выходное сопротивление, кОм	2.5
Максимально допустимое давление, кПа	138

Таблица А.2 – Основные параметры датчика DS1820

Характеристики	DS 1820
Тип корпуса (обозначение изделия)	PR 32 (DS1820) 208 mil 8-выводной SOIC
Точность (температурный диапазон)	(-10 °C до +85 °C) $\pm 0,5$ °C
Максимальный температурный диапазон	от -55 °C до +125 °C
Разрешение	12-разрядное
Диапазон питающего напряжения	3,6...5,5 В
Паразитное питание	да
Режим работы	Однократное измерение, непрерывное преобразование, режим термостата
Возможность поиска сигнальных уровней	Нет
Возможность режима термостата	Да, может быть запрограммирован для использования как автономный термостат
Ток потребления в активном режиме	1 mA
Ток покоя	3μA
Время преобразования (max)	1 с
Сетевой адрес группового кода (16-ричный)	Без адреса
Дополнительные опции и особенности	<i>Не требует внешних компонентов, время преобразования температуры в цифровой код не более 1 с</i>

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Программы для статистических исследований выборочных совокупностей для долевых и поперечных образцов (Maple 9.5)

```

>
> restart;
> with(stats):with(describe):
>
X:=[31.6,32.1,28.5,28.9,35.9,30.5,34.0,32.9,31.1,26.4,34.9,35.9,33.
6,33.5,32.8,35.8,23.1,33.6,34.4,35.9
36.0,36.0,30.5,34.5,31.9,33.0,33.0,33.7,32.5,35.5,32.8,30.5,31.8,25
.8,30.5,36.4,33.0,29.9,32.3,28.4
27.5,34.0,29.1,32.2,35.9,30.9,24.7,30.9,31.1,33.4,37.9,32.9,27.3,34
.1,33.6,27.8,32.8,33.8,25.9,34.2];

X:=[31.6, 32.1, 28.5, 28.9, 35.9, 30.5, 34.0, 32.9, 31.1, 26.4, 34.9, 35.9, 33.6, 33.5,
    32.8, 35.8, 23.1, 33.6, 34.4, 35.9, 36.0, 36.0, 30.5, 34.5, 31.9, 33.0, 33.0, 33.7, 32.5,
    35.5, 32.8, 30.5, 31.8, 25.8, 30.5, 36.4, 33.0, 29.9, 32.3, 28.4, 27.5, 34.0, 29.1, 32.2,
    35.9, 30.9, 24.7, 30.9, 31.1, 33.4, 37.9, 32.9, 27.3, 34.1, 33.6, 27.8, 32.8, 33.8, 25.9,
    34.2]

> n:=count(X);
                                     n := 60

> ran:=range(X);
                                     ran := 23.1 .. 37.9

> xmin:=op(1,ran);xmax:=op(2,ran);
                                     xmin := 23.1
                                     xmax := 37.9

> l:=floor(1+3.32*log[10](n));
                                     l := 6

> var:=xmax-xmin;h:=evalf(var/l);
                                     var := 14.8
                                     h := 2.466666667

>
z[0]:=xmin;z[1]:=z[0]+h;z[2]:=z[1]+h;z[3]:=z[2]+h;z[4]:=z[3]+h;z[5]
:=z[4]+h;z[6]:=z[5]+1.001*h;
                                     z0 := 23.1
                                     z1 := 25.56666667
                                     z2 := 28.03333334
                                     z3 := 30.50000001
                                     z4 := 32.96666668
                                     z5 := 35.43333335

```

$$z_6 := 37.90246668$$

```
> with(transform) :
```

Warning, the protected name apply has been redefined and unprotected

```
>
```

```
r:=statsort(tallyinto(X,[z[0]..z[1],z[1]..z[2],z[2]..z[3],z[3]..z[4],z[4]..z[5],z[5]..z[6]]));
```

```
r := [Weight(23.1 .. 25.56666667, 2), Weight(25.56666667 .. 28.03333334, 6),
      Weight(28.03333334 .. 30.50000001, 9), Weight(30.50000001 .. 32.96666668, 16),
      Weight(32.96666668 .. 35.43333335, 17),
      Weight(35.43333335 .. 37.90246668, 10)]
```

```
> m:=frequency(r) ;
```

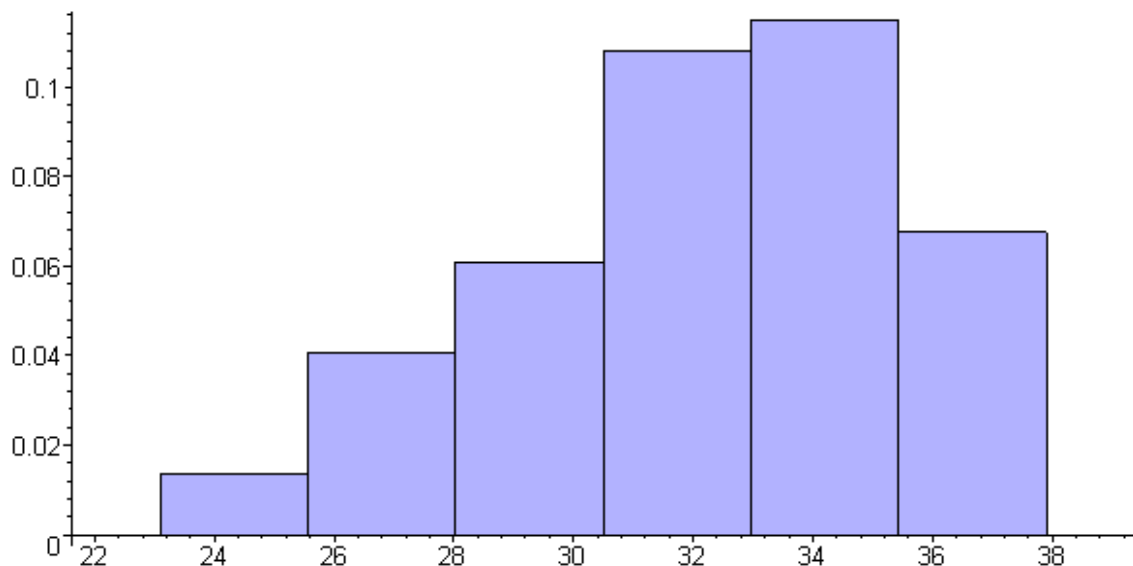
$$m := [2, 6, 9, 16, 17, 10]$$

```
> R:=scaleweight[1/n](r) ;
```

```
R := [ Weight(23.1 .. 25.56666667,  $\frac{1}{30}$ ), Weight(25.56666667 .. 28.03333334,  $\frac{1}{10}$ ),
      Weight(28.03333334 .. 30.50000001,  $\frac{3}{20}$ ),
      Weight(30.50000001 .. 32.96666668,  $\frac{4}{15}$ ),
      Weight(32.96666668 .. 35.43333335,  $\frac{17}{60}$ ), Weight(35.43333335 .. 37.90246668,  $\frac{1}{6}$ ) ]
```

```
> with(statplots) :
```

```
> histogram(R) ;
```



```
>
```

```
>
```

```
> mx:=mean(X) ;
```

$$mx := 32.05666667$$

```
> Dx:=variance(X) ;
```

$$Dx := 9.941788885$$

```
> sigma[x]:=standarddeviation(X) ; sigm:=evalf(sqrt(Dx)) ;
```



```

σx := 3.153060241
sigm := 3.153060241
> Dx1:=moment[2,mean,1](X);
Dx1 := 10.11029378
> asymmetry:=moment[3,mean](X)/sigma[x]^3;asim:=skewness(X);
asimmetry := -0.7429666478
asim := -0.7429666478
> excess:=moment[4,mean](X)/sigma[x]^4-3; exc:=kurtosis(X)-3;
excess := 0.145278464
exc := 0.145278464

```

```

>
>
>
>

```

```

> f:=(a,s,x)->x^(a-1)*exp(-s*x)*s^a/int(t^(a-1)*exp(-
t),t=0..infinity);

```

$$f := (a, s, x) \rightarrow \frac{x^{(a-1)} e^{(-sx)} s^a}{\int_0^{\infty} t^{(a-1)} e^{(-t)} dt}$$

```

>

```

```

f(a,s,z[0]);f(a,s,z[1]);f(a,s,z[2]);f(a,s,z[3]);f(a,s,z[4]);f(a,s,z
[5]);f(a,s,z[6]);

```

```

0.001287219264

```

```

0.01404468348

```

```

0.05978805042

```

```

0.1164116868

```

```

0.1171006276

```

```

0.06694747725

```

```

0.02344366762

```

```

>

```

1). Гипотеза о гамма-распределении.

```

> s:=mx/Dx1;a:=mx^2/Dx1;

```

```

s := 3.170695864

```

```

a := 101.6419404

```

```

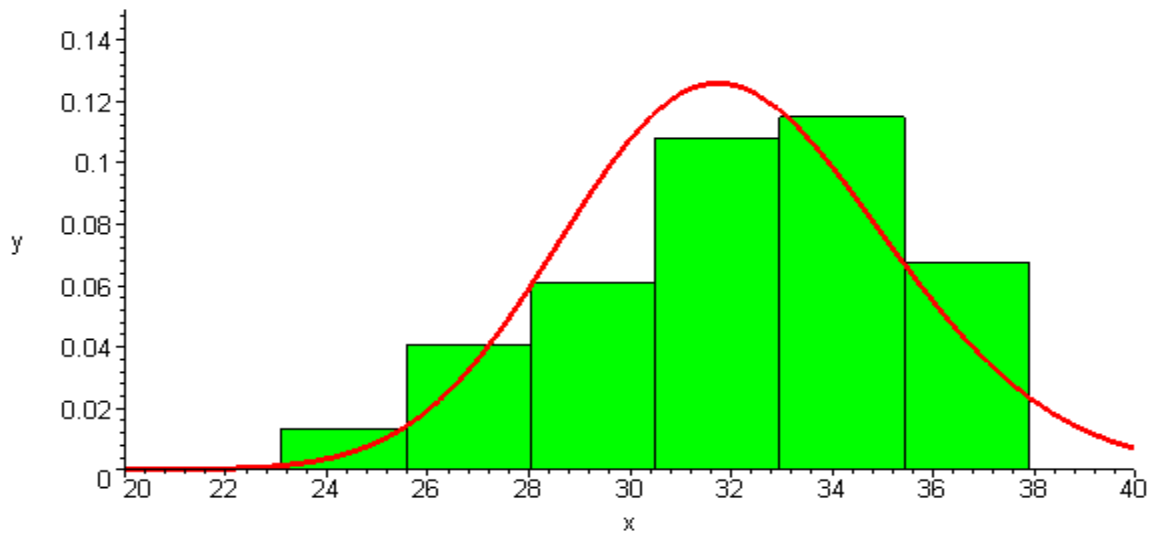
>

```

```

> histogram(R, color=green):
plot(x^(a-1)*exp(-s*x)*s^a/int(t^(a-1)*exp(-t),t=0..infinity),
x=20..40, y=0..0.15, color=red,thickness=3):
plots[display]({%,%%});

```



>

```
> p[1]:=evalf(int(x^(a-1)*exp(-s*x)*s^a/int(t^(a-1)*exp(-t),t=0..infinity),x=0..z[1]));
```

$p_1 := 0.01522654724$

```
> p[1]:=evalf(int(x^(a-1)*exp(-s*x)*s^a/int(t^(a-1)*exp(-t),t=0..infinity),x=z[l-1]..100));
```

$p_6 := 0.1446645988$

```
> for j from 2 to l-1 do p[j]:=int(x^(a-1)*exp(-s*x)*s^a/int(t^(a-1)*exp(-t),t=0..infinity),x=z[j-1]..z[j]) od;
```

$p_2 := 0.08345755422$

$p_3 := 0.2224538379$

$p_4 := 0.3030591158$

$p_5 := 0.2311383463$

```
> for j from 1 to l do n*p[j] od;
```

0.9135928344

5.007453253

13.34723027

18.18354695

13.86830078

8.679875928

>

```
k1:=5;m[1]:=m[1]+m[2];m[2]:=m[3];m[3]:=m[4];m[4]:=m[5];m[5]:=m[6];
```

$k1 := 5$

$m_1 := 8$

$m_2 := 9$

$m_3 := 16$

$$m_4 := 17$$

$$m_5 := 10$$

```
> p[1]:=p[1]+p[2];p[2]:=p[3];p[3]:=p[4];p[4]:=p[5];p[5]:=p[6];
    p1 := 0.09868410146
```

$$p_2 := 0.2224538379$$

$$p_3 := 0.3030591158$$

$$p_4 := 0.2311383463$$

$$p_5 := 0.1446645988$$

```
> hikv:=sum((m[i]-n*p[i])^2/n/p[i],i=1..k1);
    hikv := 3.316029427
```

>

2). Вероятность относительного увлажнения

```
> P(OYK<31.9516)=int(x^(a-1)*exp(-s*x)*s^a/int(t^(a-1)*exp(-
t),t=0..infinity),x=0..31.9516);
    P(OYK < 31.9516) = 0.5000001532
```

```
> b:=6.21553;mx-b;mx+b;
```

$$b := 6.21553$$

$$25.84113667$$

$$38.27219667$$

```
> P1=int(x^(a-1)*exp(-s*x)*s^a/int(t^(a-1)*exp(-
t),t=0..infinity),x=mx-b..mx+b);
    P1 = 0.9500001482
```

>

>

```
> restart;
```

```
> with(stats):with(describe):
```

>

```
X:=[32.6,29.0,33.6,36.4,35.7,35.0,31.2,30.4,36.5,29.6,34.1,30.9,33.
1,33.0,37.5,35.0,31.2,21.3,35.8,31.3
32.9,33.4,33.2,32.5,32.0,29.1,31.7,32.9,34.4,32.4,38.3,29.4,30.7,35
.2,34.8,28.9,34.6,33.1,39.6,32.0
34.9,34.9,33.4,38.5,34.9,34.0,32.6,31.2,25.6,31.4,34.1,38.4,34.5,27
.6,34.5,31.0,34.0,25.5,28.1,27.1];
```

```
X:= [32.6, 29.0, 33.6, 36.4, 35.7, 35.0, 31.2, 30.4, 36.5, 29.6, 34.1, 30.9, 33.1, 33.0,
    37.5, 35.0, 31.2, 21.3, 35.8, 31.3, 32.9, 33.4, 33.2, 32.5, 32.0, 29.1, 31.7, 32.9, 34.4,
    32.4, 38.3, 29.4, 30.7, 35.2, 34.8, 28.9, 34.6, 33.1, 39.6, 32.0, 34.9, 34.9, 33.4, 38.5,
    34.9, 34.0, 32.6, 31.2, 25.6, 31.4, 34.1, 38.4, 34.5, 27.6, 34.5, 31.0, 34.0, 25.5, 28.1,
    27.1]
```

>

```

> n:=count(X) ;
                                n := 60

> ran:=range(X) ;
                                ran := 21.3 .. 39.6

> xmin:=op(1,ran) ;xmax:=op(2,ran) ;
                                xmin := 21.3
                                xmax := 39.6

> l:=floor(1+3.32*log[10](n)) ;
                                l := 6

> var:=xmax-xmin;h:=evalf(var/l) ;
                                var := 18.3
                                h := 3.050000000

>
z[0]:=xmin;z[1]:=z[0]+h;z[2]:=z[1]+h;z[3]:=z[2]+h;z[4]:=z[3]+h;z[5]
:=z[4]+h;z[6]:=z[5]+1.001*h;
                                z0 := 21.3
                                z1 := 24.35000000
                                z2 := 27.40000000
                                z3 := 30.45000000
                                z4 := 33.50000000
                                z5 := 36.55000000
                                z6 := 39.60305000

> with(transform) :
Warning, the protected name apply has been redefined and unprotected

>
r:=statsort(tallyinto(X,[z[0]..z[1],z[1]..z[2],z[2]..z[3],z[3]..z[4]
],z[4]..z[5],z[5]..z[6]]));
r := [21.3 .. 24.35000000, Weight(24.35000000 .. 27.40000000, 3),
      Weight(27.40000000 .. 30.45000000, 8), Weight(30.45000000 .. 33.50000000, 23),
      Weight(33.50000000 .. 36.55000000, 20), Weight(36.55000000 .. 39.60305000, 5)
      ]

> m:=frequency(r) ;
                                m := [1, 3, 8, 23, 20, 5]

> R:=scaleweight[1/n](r) ;

```

```

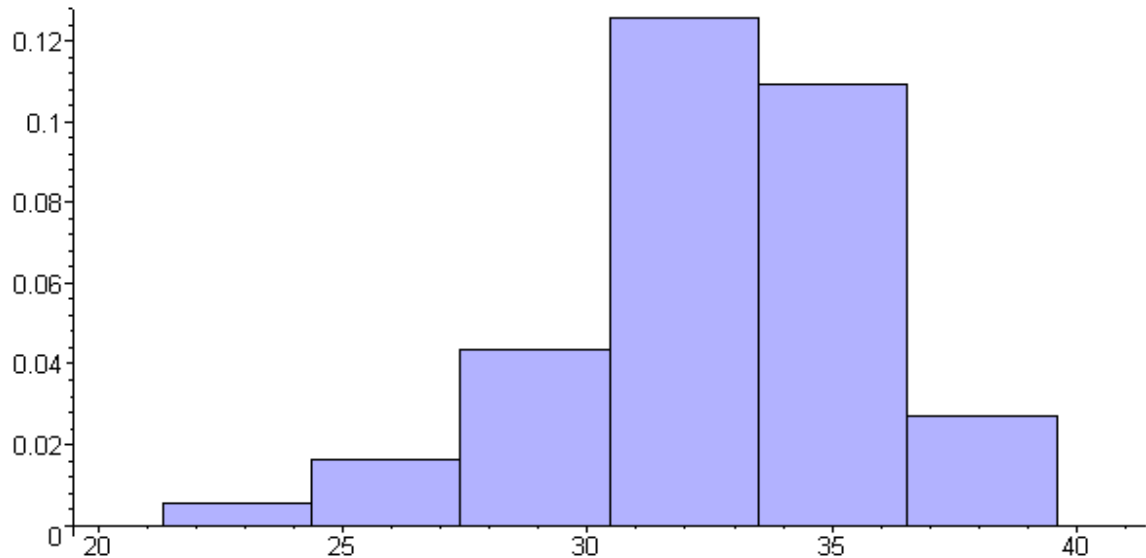
R := [ Weight( 21.3 .. 24.35000000,  $\frac{1}{60}$  ), Weight( 24.35000000 .. 27.40000000,  $\frac{1}{20}$  ),
       Weight( 27.40000000 .. 30.45000000,  $\frac{2}{15}$  ),
       Weight( 30.45000000 .. 33.50000000,  $\frac{23}{60}$  ), Weight( 33.50000000 .. 36.55000000,  $\frac{1}{3}$  ),
       Weight( 36.55000000 .. 39.60305000,  $\frac{1}{12}$  ) ]

```

```

> with(statplots) :
> histogram(R) ;

```



```

>
>

```

```

> mx:=mean(X) ;

```

$mx := 32.67500000$

```

> Dx:=variance(X) ;

```

$Dx := 11.22820833$

```

> sigma[x]:=standarddeviation(X) ; sigm:=evalf(sqrt(Dx)) ;

```

$\sigma_x := 3.350851881$

$sigm := 3.350851881$

```

> Dx1:=moment[2,mean,1](X) ;

```

$Dx1 := 11.41851695$

```

> asymmetry:=moment[3,mean](X)/sigma[x]^3; asim:=skewness(X) ;

```

$asymmetry := -0.6909838180$

$asim := -0.6909838180$

```

> excess:=moment[4,mean](X)/sigma[x]^4-3; exc:=kurtosis(X)-3;

```

$excess := 1.191726821$

$exc := 1.191726821$

```

>
>

```

```
> f:=(a,s,x)->x^(a-1)*exp(-s*x)*s^a/int(t^(a-1)*exp(-t),t=0..infinity);
```

$$f:=(a,s,x) \rightarrow \frac{x^{(a-1)} e^{(-sx)} s^a}{\int_0^\infty t^{(a-1)} e^{(-t)} dt}$$

```
>
```

```
f(a,s,z[0]);f(a,s,z[1]);f(a,s,z[2]);f(a,s,z[3]);f(a,s,z[4]);f(a,s,z[5]);f(a,s,z[6]);
```

```
0.0001042279512
```

```
0.004015181395
```

```
0.03582145993
```

```
0.1008544432
```

```
0.1117272854
```

```
0.05731050341
```

```
0.01537765501
```

```
>
```

```
>
```

```
>
```

1). Гипотеза о гамма - распределении.

```
> s:=mx/Dx1;a:=mx^2/Dx1;
```

```
s := 2.861580023
```

```
a := 93.50212726
```

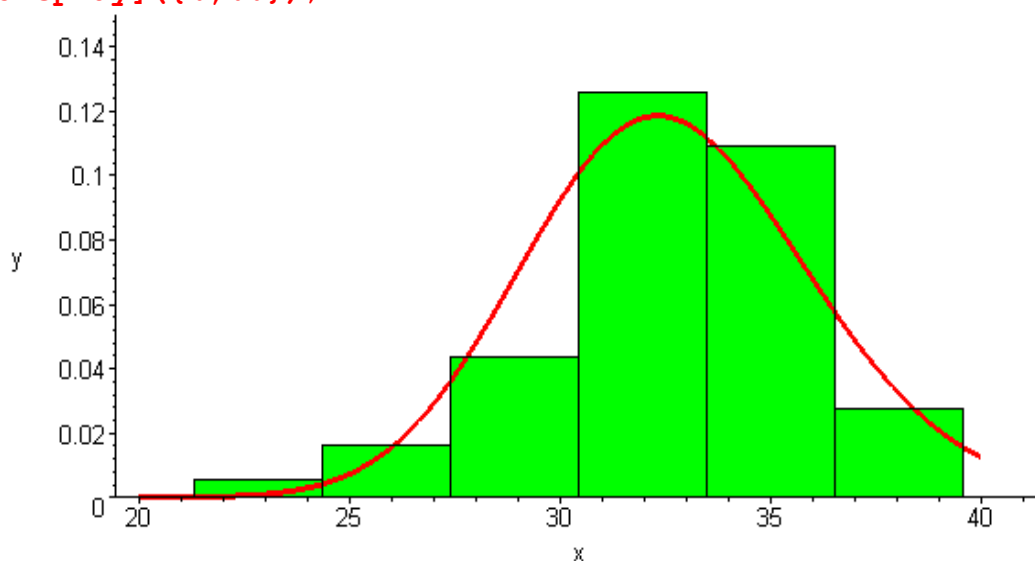
```
>
```

```
> histogram(R, color=green):
```

```
plot(x^(a-1)*exp(-s*x)*s^a/int(t^(a-1)*exp(-t),t=0..infinity),
```

```
x=20..40, y=0..0.15, color=red,thickness=3):
```

```
plots[display]({%,%%});
```



```
>
```

```
> p[1]:=evalf(int(x^(a-1)*exp(-s*x)*s^a/int(t^(a-1)*exp(-t),t=0..infinity),x=0..z[1]));
```

```


$$p_1 := 0.003730295136$$

> p[1]:=evalf(int(x^(a-1)*exp(-s*x)*s^a/int(t^(a-1)*exp(-
t),t=0..infinity),x=z[1-1]..100));

$$p_6 := 0.1274632630$$

> for j from 2 to l-1 do p[j]:=int(x^(a-1)*exp(-s*x)*s^a/int(t^(a-
1)*exp(-t),t=0..infinity),x=z[j-1]..z[j]) od;

$$p_2 := 0.04899201512$$


$$p_3 := 0.2085779003$$


$$p_4 := 0.3476291775$$


$$p_5 := 0.2636073493$$

> for j from 1 to l do n*p[j] od;
0.2238177082
2.939520907
12.51467402
20.85775065
15.81644096
7.647795780
>
k1:=5;m[1]:=m[1]+m[2];m[2]:=m[3];m[3]:=m[4];m[4]:=m[5];m[5]:=m[6];

$$k1 := 5$$


$$m_1 := 4$$


$$m_2 := 8$$


$$m_3 := 23$$


$$m_4 := 20$$


$$m_5 := 5$$

> p[1]:=p[1]+p[2];p[2]:=p[3];p[3]:=p[4];p[4]:=p[5];p[5]:=p[6];

$$p_1 := 0.05272231026$$


$$p_2 := 0.2085779003$$


$$p_3 := 0.3476291775$$


$$p_4 := 0.2636073493$$


$$p_5 := 0.1274632630$$

> hikv:=sum((m[i]-n*p[i])^2/n/p[i],i=1..k1);

$$hikv := 4.093273864$$

>

```

2). Вероятность относительного увлажнения

```
> P(OYK<32.5586)=(int(x^(a-1)*exp(-
s*x)*s^a,x=0..32.5586))/int(t^(a-1)*exp(-t),t=0..infinity);
P(OYK<32.5586)=0.5000013779

> b:=6.6039;mx-b;mx+b;
b:=6.6039
26.07110000
39.27890000

> P1=int(x^(a-1)*exp(-s*x)*s^a/int(t^(a-1)*exp(-
t),t=0..infinity),x=mx-b..mx+b);
P1=0.9500000913

>
```


ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Таблица В.1 – Результаты расчёта конечного модуля упругости E_K кож хромового дубления различной условной микрокапиллярной пористости Π в зависимости от времени вакуумно-сорбционного увлажнения

Время, с условная микрокапиллярная пористость	Конечный модуль упругости, E_K , МПа						
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
120	30,9	35,4	39,9	44,4	48,8	53,2	57,7
180	28,8	32,2	35,7	39,1	42,4	45,9	49,3
240	26,2	28,3	30,4	32,5	34,6	36,7	38,8
300	22,5	22,8	23,1	23,4	23,6	23,9	24,2
360	18,9	17,4	15,9	14,3	12,8	11,3	9,8
420	15,4	12,1	8,8	5,5	2,2	-1,1	-4,4

Таблица В.2 – Результаты расчёта полной деформации $\Delta_{\text{полн}}$ кож хромового дубления различной толщины d от времени при фиксации (условная микрокапиллярная пористость $\Pi=0,1$, усилие $F=200$ Н)

Время, с Толщина d , м	Полная деформация, $\Delta_{\text{полн}}$, %								
	0,000 8	0,001	0,001 2	0,001 4	0,001 6	0,001 8	0,002	0,002 2	0,002 4
1	10	9	8	7	6	5	4	3	2
120	33,08	32,65	32,23	31,81	31,38	30,96	30,54	30,12	29,69
180	37,93	37,10	36,27	35,45	34,62	33,79	32,96	32,14	31,31
240	44,52	43,14	41,76	40,39	39,01	37,63	36,26	34,88	33,51
300	53,74	51,60	49,45	47,31	45,16	43,02	40,87	38,73	36,58
360	63,81	60,82	57,84	54,86	51,87	48,89	45,90	42,92	39,94

Таблица В.3 – Результаты расчёта остаточной деформации кож хромового дубления Δ_k от времени вакуумной сушки при подаче пара с бахтармянной стороны ($\mu = 3,2$)

Время, с условная микрокапиллярная пористость	Остаточная деформация Δ_k , %				
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
120	31,63	37,97	44,32	50,67	56,95
180	28,66	33,52	38,38	43,23	48,04
240	25,11	28,18	31,25	34,33	37,36
300	19,02	19,03	19,04	19,05	19,06
360	13,57	10,84	8,11	5,38	2,68
420	9,93	5,38	0,82	-3,74	-8,25
480	5,47	-1,33	-8,13	-14,93	-21,65

Таблица В.4 – Результаты расчёта остаточной кож хромового дубления Δ_k от времени вакуумной сушки при подаче пара с лицевой стороны ($\mu = 7,5$)

Время, с условная микрокапиллярная пористость	Остаточная деформация Δ_k , %				
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
120	24,41	27,09	29,81	32,53	35,25
180	23,14	25,19	27,27	29,36	31,44
240	21,62	22,92	24,23	25,55	26,87
300	19,01	19,01	19,02	19,02	19,03
360	16,68	15,52	14,35	13,18	12,01
420	15,12	13,19	11,24	9,28	7,33
480	13,21	10,33	7,42	4,50	1,59

Таблица В.5 – Результаты расчёта конечной деформации Δ_k кож хромового дубления от времени влажно-тепловой обработки при подаче пара с бахтармянной стороны ($\mu = 3,2$)

Время, с условная микрокапиллярная пористость	Конечная деформация Δ_k , %				
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
120	31,63	37,97	44,32	50,67	56,95
180	28,66	33,52	38,38	43,23	48,04
240	25,11	28,18	31,25	34,33	37,36
300	19,02	19,03	19,04	19,05	19,06
360	13,57	10,84	8,11	5,38	2,68
420	9,93	5,38	0,82	-3,74	-8,25
480	5,47	-1,33	-8,13	-14,93	-21,65

Таблица В.6 – Результаты расчёта конечной деформации Δ_k кож хромового дубления от времени влажно-тепловой обработки при подаче пара с лицевой стороны ($\mu = 7,5$)

Время, с условная микрокапиллярная пористость	Конечная деформация Δ_k , %				
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
120	24,41	27,09	29,81	32,53	35,25
180	23,14	25,19	27,27	29,36	31,44
240	21,62	22,92	24,23	25,55	26,87
300	19,01	19,01	19,02	19,02	19,03
360	16,68	15,52	14,35	13,18	12,01
420	15,12	13,19	11,24	9,28	7,33
480	13,21	10,33	7,42	4,50	1,59

Таблица В.7 – Результаты расчёта коэффициента диффузии пара D от времени при совмещении операций

Время, с условная микрокапиллярная пористость	Коэффициент диффузии пара $D \cdot 10^{-5}$, м ² /с						
	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1
120	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30
180	4,92	5,35	5,77	6,19	6,61	7,03	7,46
240	1,37	2,24	3,10	3,97	4,84	5,70	6,57
300	-2,22	-0,91	0,41	1,72	3,04	4,35	5,67
360	-6,13	-4,33	-2,52	-0,72	1,08	2,89	4,69
420	-10,35	-8,02	-5,69	-3,36	-1,03	1,31	3,64
480	-14,58	-11,72	-8,86	-6,00	-3,14	-0,28	2,58

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Рекомендации по созданию универсальной вакуумной установки

На основе результатов исследования режимов интенсифицированных гигротермических воздействий (увлажнения, влажно-тепловой фиксации, влажно-тепловой обработки) на заготовки верха обуви, с использованием вакуума на перфорированном пуансоне [63, 73, 75, 79,], разработаны технологический процесс ИГО и рекомендации по созданию универсальной вакуумной установки.

Заготовки обуви в соответствии с требованиями технологического процесса изготовления обуви увлажняются в течение заданного времени влажным насыщенным паром, полученным при пониженном давлении.

Параллельно с увлажнением (если требуется по технологии) может быть осуществлена влажно-тепловая фиксация заготовок верха обуви на перфорированном пуансоне с одновременным вакуумированием их с бахтармянной стороны и приложением давления с лицевой стороны.

В зависимости от требуемой типовой технологией последовательности обработки заготовок верха обуви на установке могут быть осуществлены процессы сушки и влажно-тепловой обработки после основного формования, осуществляемого вне камеры.

Данные воздействия выполняются с лицевой стороны заготовок верха обуви путем циклически создаваемого вакуума и циклической подачи перегретого пара при сушке или влажного насыщенного пара при влажно-тепловой обработке, с лицевой стороны заготовок верха обуви в течение установленного времени.

Рекомендуемые режимы воздействий, установленные в результате исследований:

а) при увлажнении:

- вакуумирование рабочей камеры с заготовками обуви до величины остаточного давления 0,01...0,02 МПа;

- выдержка заготовок обуви во влажном, насыщенном влагой не менее чем на 97 % паре, имеющем температуру 60–65 °С до повышения остаточного давления в вакуумной камере до 0,03...0,04 МПа;

- напуск воздуха в рабочую камеру до достижения в ней атмосферного давления.

б) при влажно-тепловой фиксации: производимой параллельно с увлажнением:

- вакуумирование рабочей камеры с заготовками обуви до величины остаточного давления 0,015...0,02 МПа;

- выдержка заготовок обуви во влажном, насыщенном влагой не менее чем на 97 % паре, имеющем температуру 60–65 °С до повышения остаточного давления в вакуумной камере до 0,03...0,04 МПа;

- вакуумирование заготовок с бахтармянной стороны и создание давления воздухом на поверхность заготовок с воздухонепроницаемой пленкой до 0,15-0,2 МПа;

- напуск воздуха в рабочую камеру до достижения в ней атмосферного давления.

в) при сушке:

- вакуумирование рабочей камеры с заготовками обуви до величины остаточного давления 0,01...0,02 МПа в течение 1–3-х циклов;

- подача сухого (не менее чем на 55 %) пара, имеющего температуру 65–75 °С до повышения остаточного давления в вакуумной камере до 0,03...0,04 МПа, в течение 1–3-х циклов в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемых материалов;

г) при влажно-тепловой обработке режимные

- вакуумирование рабочей камеры с заготовками обуви до величины остаточного давления 0,01...0,02 МПа;

– выдержка заготовок обуви во влажном, насыщенном влагой не менее чем на 97 % паре, имеющем температуру 65–70 °С до повышения остаточного давления в вакуумной камере до 0,03...0,04 МПа;

– напуск воздуха в рабочую камеру до достижения в ней атмосферного давления;

Параметры установки для ИГО заготовок верха обуви в вакууме приведены в таблице Г.1.

Таблица Г.1- Параметры установки для ИГО заготовок верха обуви в вакууме

Производительность, пар/ч	50
Время, мин:	
увлажнения	2...4
влажно-тепловой фиксации	2...4
сушки	2...4
влажно-тепловой обработки	1...2
Привес влаги, %:	
при увлажнении	+(12...16)
при сушке	-(5...10)
при влажно-тепловой обработке	+(2...3)
Установленная мощность, кВт:	
вакуумного насоса	- не более 1
электронагревателя парогенератора	- не более 2
Норма обслуживания, чел	- I
Источник питания	- электрическая сеть трёхфазного тока промышленной частоты напряжением 380/ 220 В
Конструктивное исполнение	напольный вариант

Технический уровень предлагаемой установки подтверждён патентами РФ № 2349238 «Способ гигротермической фиксации заготовок верха обуви» [118], №2411888 «Устройство для гигротермической фиксации заготовок верха обуви с регулируемыми параметрами рабочей среды» [119], свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617180 «Информационно-управляющая оболочка опытной установки для гигротермической обработки кожи» [140], патентом №2414832 «Устройство для увлажнения заготовок верха обуви с регулируемым объёмом рабочей камеры» [120].

Принципиальная схема установки представлена на рисунке Г.1 [48].

Предлагаемая установка содержит верхний отсек 1 и нижний отсек 2 вакуумной камеры, загрузочный отсек 3, выполненный в виде ёмкости, герметично закрывающуюся дверь 4, жёстко закреплённую сменную перфорированную перегородку 5, вакуумный насос 6, ёмкость 7 для воды со встроенными электронагревателями 8, вакуумированную ёмкость 9, систему автоматического управления 10. Система автоматического управления 10 включает в себя клапан 11 отсечки верхнего отсека 1 от вакуумного насоса 6, клапан 12 отсечки нижнего отсека 2 от вакуумного насоса 6, клапаны 13 и 14 напуска воздуха в оба отсека, клапан 15 отсечки верхнего отсека 1 от вакуумированной ёмкости 9, клапан 16 отсечки нижнего отсека 2 от вакуумированной ёмкости 9, клапан 17 отсечки вакуумированной ёмкости 9 от вакуумного насоса 6.

В исходном положении верхний отсек 1 открыт, нижний отсек 2 отделён перфорированной неподвижной перегородкой 5, загрузочный отсек 3 загерметизирован дверью 4, электронагреватели 8 включены в ёмкости для воды 7. Вакуумный насос 6 соединён через клапан 17 с вакуумированной ёмкостью 9, клапаны 11, 12 отсечки вакуумных отсеков 1 и 2 от вакуумного насоса 6 и клапаны 15 и 16 отсечки отсеков 1 и 2 от вакуумированной ёмкости 9 закрыты. Клапан 13 напуска воздуха в верхний отсек 1 открыт, а клапан 14 напуска воздуха в нижний отсек 2 закрыт.

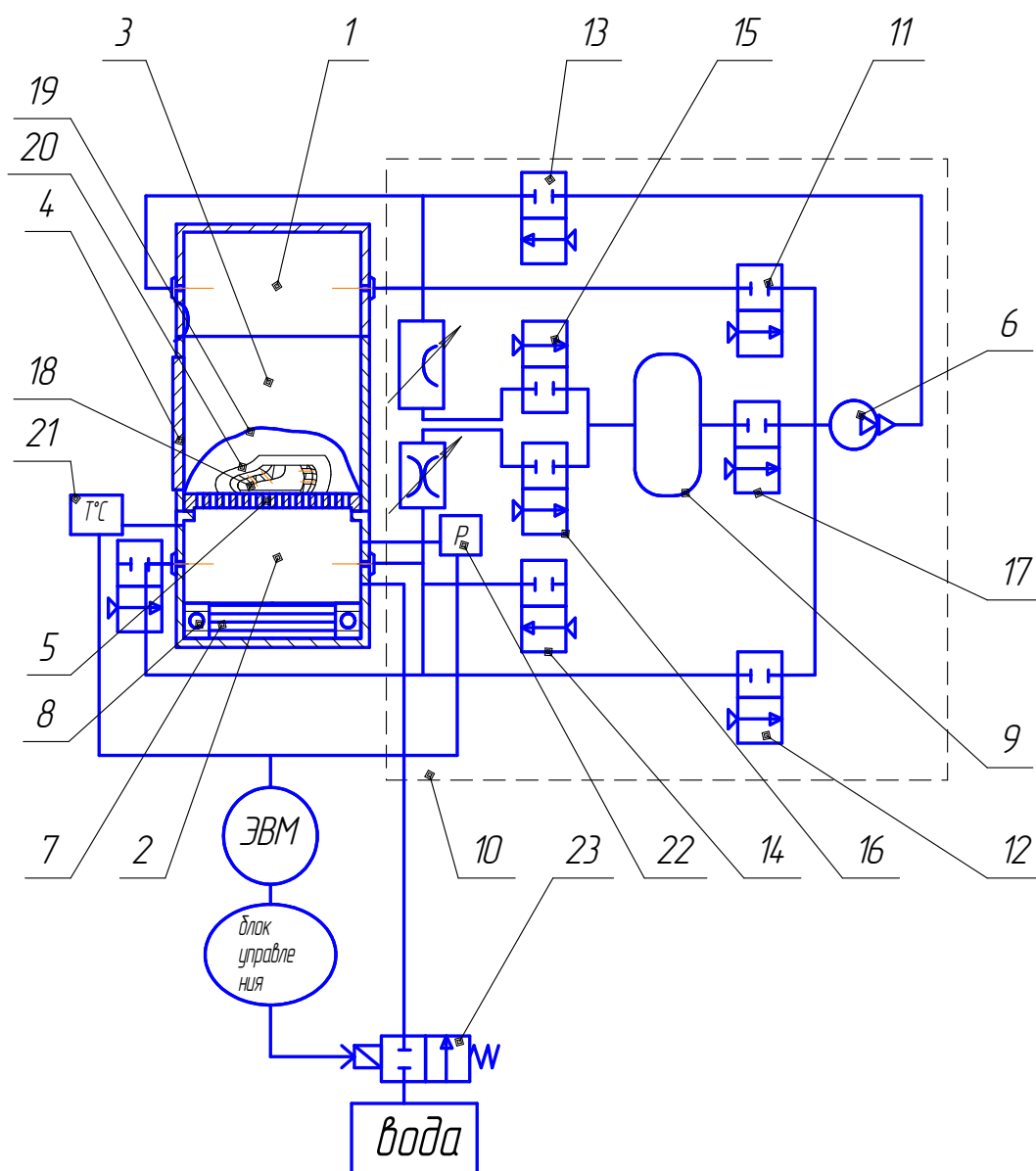


Рисунок Г.1 – Устройство для ИГО заготовок верха обуви в вакууме

Узел автоматического регулирования состоит из датчиков температуры 21 и давления 22, находящихся в нижнем отсеке 2, связанных через ЭВМ и блок преобразования с электромагнитным золотником управления 23, который по мере необходимости обеспечивает подачу воды.

Устройство работает следующим образом: открыв дверь 4, устанавливают перфорированную колодку 18, на перфорированную перегородку 5, на перфорированную колодку 18 помещают заготовку обуви 20. заготовку обуви 20 накрывают воздухонепроницаемой плёнкой 19, края которой закрепляют на основании перфорированной перегородки 5. Затем включают электронагреватели 8 в

ёмкости 7 для воды в нижнем отсеке 2. После этого дверью 4 герметизируют загрузочно-выгрузочный отсек 3. Закрывают клапаны 11 и 17, вакуумный насос 6 через клапан 12 и вакуумированная ёмкость 9 через клапан 16, создают разрежение в герметичном отсеке 2. Одновременно откачиваемый из нижнего отсека 2 воздух поступает через клапан 13 в верхний отсек 1, начиная создавать в нём давление, прижимает воздухонепроницаемую плёнку 19 к заготовке обуви 20. При достижении степени разрежения в нижнем отсеке 2, равном 0,02 МПа и температуре нагрева воды в ёмкости 7 до 60 °С, начинает образовываться влажный пар, который в течение двух минут производит увлажнение заготовки обуви 20 на перфорированной колодке 18 изнутри. по мере повышения давления в нижнем отсеке 2 камеры пар перегревается и начинает осуществлять сушку изнутри. Вакуумный насос 6 циклически (2-3 раза) отключается клапанами 16 и 12 из нижнего отсека 2 и присоединяется клапаном 17 к вакуумированной ёмкости 9, создавая в ней пониженное давление, а затем через 1-2 минуты вновь вакуумирует нижний отсек 2, производя сушку. В конце цикла через клапан 14 напускают воздух в герметичный отсек 2, заготовка остывает, после чего её через дверцу 4 извлекают из загрузочного отсека 3.

Для регулирования параметров рабочей среды – пара – используются датчики температуры (Т) 21 и давления (Р) 22, которые связаны с ЭВМ, где их показания сравниваются с заданной зависимостью $T = f(P)$ для достижения требуемых параметров. В случае рассогласования этих показателей, сигнал поступает на электромагнитный золотник управления 23, через который подаётся порция воды до наступления согласования между показателями Т °С и Р при увлажнении. При сушке рост температуры должен опережать рост давления и поддерживаться в соответствии с параметрами сухого пара.

Таким образом, установка для ИГВ заготовок верха обуви в вакууме включает в себя рабочую камеру, перфорированную перегородку для установки, колодок с одетыми на них заготовками верха обуви, воздухонепроницаемую плёнку для герметизации нижнего отсека камеры от верхнего, парогенератор, вакуумный насос с приводом, систему автоматического управления.

Форма камер должна быть цилиндрической, так как такая форма является оптимальной для сосудов, работающих под давлением.

Внутренние поверхности камер в целях защиты от коррозии должны иметь защитные покрытия или выполняться из нержавеющей стали.

При увлажнении парогенератор должен обеспечивать подачу насыщенного влагой не менее чем на 97 % пара. С целью обеспечения требуемой влажности парогенератор размещён внутри увлажнительной камеры и имеет открытую, свободно испаряющуюся водяную поверхность.

При сушке происходит подача сухого пара 55 % влажности из парогенератора, также размещённого внутри камеры.

Вакуумный насос должен обеспечивать откачивание воздушной смеси из камеры в объёме не менее 1,2 м³/мин. Привод вакуумного насоса должен осуществляться от стандартного электродвигателя.

Установка для ИГО заготовок обуви в вакууме должна использоваться в цехах и участках предприятий сферы услуг по индивидуальному изготовлению и ремонту обуви. Режим работы установки периодический, по мере необходимости выполнения последовательно операций «увлажнение», «влажно-тепловая фиксация», «сушка», «влажно-тепловая обработка» заготовок верха обуви.

Приложение

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса (ЮРГУЭС)
ул. Шевченко, д. 147, г. Шахты Ростовской обл. 346500
тел. (8636) 22-20-37, факс (8636) 22-54-91. E-mail: mail@sssu.ru
ОКПО 03049194, ИНН/КПП 6155017456/615501001

_____ № _____
на _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

**Проректор по научной
работе, профессор, д.т.н.**

_____ В.И. Марчук

МП
"_____" _____ 2010 г.

ПРОГРАММА ДЛЯ ЭВМ:

**«Информационно управляющая оболочка опытной установки для
гигротермической обработки кож»**

Фрагменты исходного текста программы

Листов 10

Авторы:

_____ И.В. Тарара
_____ В.В. Смирнов
_____ Л.В. Ларина

2010 г.
//-----

```

#include <vcl.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#pragma hdrstop

#include "mabn.h"
//-----
#pragma package(smart_init)
#pragma link "VaClasses"
#pragma link "VaComm"
#pragma resource "*.dfm"

TForm1 *Form1;

#define nach_rejg 10
#define k_k 0.0036
#define k_b -1.6973

void Inin_Tab_Zad(void);
void Save_T_Z(void);
void File_Load_TZ(void);
void clear_ek(void);
void graf_dawl(void);
void obr_izm(void);
void ww_par_reg(void);
void save_rezult(void);

char fl_rabota,fl_syn;
int tek_Time;
double fi;
union lon{
char ch[4];
int i[2];
long l;
};

char tab_temp[400][20];
char tab_dawl[400][20];
char fix;
int uk_nt,T_pr;
int T_cicl,chis_takt;
int ddx,tek_xxx;
int tem_it, daw_it;
int test_t,test_d;

//-----
__fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner)
: TForm(Owner)
{
Form1->Shape1->Brush->Color = clRed;

```

```

Form1->Shape2->Brush->Color = clYellow;
Form1->Shape4->Brush->Color = clRed;
Form1->Shape5->Brush->Color = clRed;
Form1->UpDown1->Visible = false;
Form1->Button9->Visible = false;
Form1->UpDown2->Visible = false;
Form1->Button10->Visible = false;
Form1->Button8->Enabled = false;
VaComm1->Open();
clear_ek();
fl_rabota = 0;
Inin_Tab_Zad();
T_pr = atoi(Form1->Edit7->Text.c_str());
}
//-----
// Пуск
void __fastcall TForm1::Button1Click(TObject *Sender)
{
Form1->Shape1->Brush->Color = clLime;
fl_rabota = 1; tek_Time = 0;
Form1->Edit3->Text = "0";
clear_ek();
T_pr = atoi(Form1->Edit7->Text.c_str());
ww_par_reg();
Form1->VaComm1->WriteChar(0x02);
}
//-----

void ww_par_reg(void)
{
int i,j;
char ch1,ch2;
char bf_zn[10];
double kd;

strcpy(bf_zn,Form1->Edit5->Text.c_str());
if(bf_zn[3] == '5')
ch2 = 1;
else
ch2 = 0;
bf_zn[2] = 0;
l.i[0] = atoi(bf_zn);
l.i[0] = 2*l.i[0] +ch2;
//Form1->Edit4->Text = AnsiString(l.i[0]);

// kd = ((double)i*(double)k_k) + (double)k_b;
// l.ch[0] = buf_Com1_Inp[2]; l.ch[1] = buf_Com1_Inp[1];
Form1->VaComm1->WriteChar(0x03);
Form1->VaComm1->WriteChar(l.ch[1]);
Form1->VaComm1->WriteChar(l.ch[0]);

```

```

strcpy(bf_zn,Form1->Edit4->Text.c_str());
kd = atof(Form1->Edit4->Text.c_str());

l.i[0] = int(((k_b) - kd)/k_k);

Form1->VaComm1->WriteChar(0x04);
Form1->VaComm1->WriteChar(l.ch[1]);
Form1->VaComm1->WriteChar(l.ch[0]);


//Form1->Edit5->Text = AnsiString(l.i[0]);

}
//-----
// Стрп
void __fastcall TForm1::Button2Click(TObject *Sender)
{
    fl_rabota = 0; // fix = 0;
    Form1->Shape1->Brush->Color = clRed;
    Form1->Shape2->Brush->Color = clYellow ;
    // Form1->Edit3->Text = "0";
    Form1->VaComm1->WriteChar(0x01);

}
//-----
//Калибровка датчика давления
void __fastcall TForm1::Button7Click(TObject *Sender)
{
    Form1->UpDown1->Visible = true;
    Form1->Button9->Visible = true;
    Form1->Panel3->Color = clFuchsia; //Red;
    Form1->Button6->Enabled = true;
    // Form1->VaComm1->WriteChar(0x02);
    Form1->VaComm1->WriteChar(0x09);

}
//-----

//Калибровка датчика температуры
void __fastcall TForm1::Button6Click(TObject *Sender)
{
    Form1->UpDown2->Visible = true;
    Form1->Button10->Visible = true;
    Form1->Panel4->Color = clFuchsia; //Red;
    Form1->Button7->Enabled = false;

    Form1->Button8->Enabled = true;
    //Form1->VaComm1->WriteChar(0x02);
    Form1->VaComm1->WriteChar(0x07);
}

```

```

}
//-----
//Отмена калибровки
void __fastcall TForm1::Button5Click(TObject *Sender)
{
Form1->UpDown1->Visible = false;
Form1->Button9->Visible = false;
Form1->Panel3->Color = clBtnShadow; //Red;
Form1->Button6->Enabled = true;

Form1->UpDown2->Visible = false;
Form1->Button10->Visible = false;
Form1->Panel4->Color = clBtnShadow; //Red;
Form1->Button7->Enabled = true;
Form1->VaComm1->WriteChar(0x08);
Form1->VaComm1->WriteChar(0x0a);
// Form1->VaComm1->WriteChar(0x02);
// Form1->Button8->Enabled = false;
}
//-----
// Инициализация таблицы заданий
void Inin_Tab_Zad(void)
{
Form1->StringGrid1->Cells[0][0] = " N ";
Form1->StringGrid1->Cells[0][1] = " 1 ";
Form1->StringGrid1->Cells[0][2] = " 2 ";
Form1->StringGrid1->Cells[0][3] = " 3 ";
Form1->StringGrid1->Cells[0][4] = " 4 ";
Form1->StringGrid1->Cells[0][5] = " 5 ";
Form1->StringGrid1->Cells[0][6] = " 6 ";
Form1->StringGrid1->Cells[0][7] = " 7 ";
Form1->StringGrid1->Cells[0][8] = " 8 ";
Form1->StringGrid1->Cells[0][9] = " 9 ";

Form1->StringGrid1->Cells[1][0] = "Давление ";
Form1->StringGrid1->Cells[2][0] = "Температура";
Form1->StringGrid1->Cells[3][0] = " Время ";

}
AnsiString FNameSave = "";
//-----
// команда сохранить таблицу заданий
void __fastcall TForm1::Button4Click(TObject *Sender)
{
if(!(SaveDialog1->Execute()))return;

FNameSave = SaveDialog1->FileName;

Save_T_Z();
}
//-----

```



```

//Сохранить таблицу заданий
void Save_T_Z(void)
{
    FILE *fp;
    int i,j,k,m;
    char nam_fil[32];
    char strf[256];
    char bf_ch[10];

    strcpy(nam_fil,FNameSave.c_str());
    // ShowMessage(FNameSave);

    if(!(fp=fopen(nam_fil,"w"))){
        ShowMessage("?????? ???????? ??????");
        return;
    }
    strcpy(strf,"#TZ");
    fputs(strf,fp);
    fputc(0x0d,fp);fputc(0x0a,fp);
    strcpy(strf,"0"); strcat(strf," ");
    strcat(strf,Form1->Edit4->Text.c_str()); strcat(strf," ");
    strcat(strf,Form1->Edit5->Text.c_str()); strcat(strf," ");
    fputs(strf,fp);
    fputc(0x0d,fp);fputc(0x0a,fp);
    for(i = 1; i < 10; i++){
        itoa(i,bf_ch,10); strcpy(strf,bf_ch); strcat(strf," ");
        strcat(strf,Form1->StringGrid1->Cells[1][i].c_str()); strcat(strf," ");
        strcat(strf,Form1->StringGrid1->Cells[2][i].c_str()); strcat(strf," ");
        strcat(strf,Form1->StringGrid1->Cells[3][i].c_str()); strcat(strf," ");
        fputs(strf,fp);
        fputc(0x0d,fp);fputc(0x0a,fp);
    }
    fclose(fp);

}

// .c_str()

// ?????? ????
AnsiString FNameLoad = "";

void __fastcall TForm1::Button11Click(TObject *Sender)
{
    if(!(OpenDialog1->Execute()))return;

    FNameLoad = OpenDialog1->FileName;
    File_Load_TZ();

}
//-----
//Загрузить таблицу заданий

```

```

void File_Load_TZ(void)
{
FILE *fp;
    int i,j,m,n;
unsigned char k;
    char nam_fil[32];
    char strf[256];
    char bf_ch[10];
    char ch1;
    int sm_str;
    strcpy(nam_fil,FINameLoad.c_str());

    if(!(fp=fopen(nam_fil,"r"))){
        ShowMessage("Ошибка открытия файла");
        return;
    }
    fgets(strf,sizeof(strf),fp);
    if(strf[2] != 'Z'){
        ShowMessage("Не тот файл");
        fclose(fp); return;
    }
    fgets(strf,sizeof(strf),fp);
    j = 0;
    for(i=2;i< 8;i++){
        ch1 = strf[i];
        if(ch1 == ' ') break;
        bf_ch[j++] = strf[i];
    }
    bf_ch[j]=0x00;
    Form1->Edit4->Text = AnsiString(bf_ch);
    j = 0; i++;
    for(;i< 12;i++){
        ch1 = strf[i];
        if(ch1 == ' ') break;
        bf_ch[j++] = strf[i];
    }
    bf_ch[j]=0x00;
    Form1->Edit5->Text = AnsiString(bf_ch);

    for(m=1;m<10;m++){
    fgets(strf,sizeof(strf),fp);
    j=0;
    for(i=2;i< 8;i++){
        ch1 = strf[i];
        if(ch1 == ' ') break;
        bf_ch[j++] = strf[i];
    }
    bf_ch[j]=0x00;
    Form1->StringGrid1->Cells[1][m] = AnsiString(bf_ch);

    j = 0; i++;

```

```

for(;i< 12;i++){
    ch1 = strf[i];
    if(ch1 == ' ') break;
    bf_ch[j++] = strf[i];
}
bf_ch[j]=0x00;
Form1->StringGrid1->Cells[2][m] = AnsiString(bf_ch);
Form1->StringGrid1->Cells[3][m] = "0";
}
fclose(fp);
}

//очистка экрана
void clear_ek(void)
{
    Form1->Image1->Canvas->Pen->Color = clWhite;
    Form1->Image2->Canvas->Pen->Color = clWhite;
    Form1->Image2->Canvas->Rectangle(0,0,Form1->Image2->Width,Form1->Image2->Height);
    Form1->Image1->Canvas->Rectangle(0,0,Form1->Image1->Width,Form1->Image1->Height);
}

void __fastcall TForm1::Timer1Timer(TObject *Sender)
{
    if(fl_rabota != 0){
        tek_Time++;

        if(tek_Time > nach_rejg) {
            Form1->Shape2->Brush->Color = clLime;
            Form1->Edit3->Text = AnsiString(tek_Time - nach_rejg);
        }

        if(tek_Time >= T_pr) {
            fl_rabota = 0; fix = 1;
            Form1->Shape1->Brush->Color = clRed;
            Form1->Shape2->Brush->Color = clYellow;
        }
    }
    if(fix == 1){
        if(chis_takt >= T_cicl){
            chis_takt = 0;
            strcpy(tab_temp[uk_nt],Form1->Edit2->Text.c_str());
            strcpy(tab_dawl[uk_nt],Form1->Edit1->Text.c_str());
            uk_nt++;
            graf_davl();
        }
    }
}

```

```

        else chis_takt++;
    }

}

int X_0_B,Y_0_B;

int Y0_tem,Y0_daw;
int xx3,yy3;

//-----
//прорисовка графика
void graf_davl(void)
{
    int pr_val;
    Form1->Edit6->Text = AnsiString(daw_it);
    pr_val = daw_it - 275;
    if((Y0_tem == 0) && (Y0_daw == 0)){
        //tem_it = test_t; daw_it = test_d;    // тестовая прорис
        Y0_tem = tem_it; Y0_daw = pr_val;

        return;
    }
    // tem_it = test_t; daw_it = test_d;    // тестовая прорис

    Form1->Image1->Canvas->Pen->Color = clRed;
    Form1->Image2->Canvas->Pen->Color = clRed;
    Form1->Image1->Canvas->MoveTo(tek_xxx,Form1->Image1->Height - Y0_tem );
    Form1->Image2->Canvas->MoveTo(tek_xxx,Form1->Image1->Height - Y0_daw);
    tek_xxx = tek_xxx + ddx;
    Form1->Image1->Canvas->LineTo(tek_xxx,Form1->Image1->Height - tem_it );
    Form1->Image2->Canvas->LineTo(tek_xxx,Form1->Image1->Height - pr_val);
    Y0_tem = tem_it; Y0_daw = pr_val;
    //test_t = test_t + 4; test_d = test_d -3;    // тестовая прорис
}

char buf_Com1_Inp[100];

void __fastcall TForm1::OnRxChar(TObject *Sender, int Count)
{
    int i,j;

    //Form1->Edit6->Text = AnsiString(Count);

    if((Count == 3) || (Count == 6)){
        VaComm1->ReadBuf(buf_Com1_Inp,Count); // 17
        VaComm1->PurgeRead();
        if((buf_Com1_Inp[0] == 0x11) || (buf_Com1_Inp[0] == 0x10)){
            obr_izm(); Form1->Shape4->Brush->Color = clLime;fl_syn = 0; return;
        }
    }
}

```

```

    }
else{
    Form1->Shape4->Brush->Color = clRed; return;
}
}

/*else{
    VaComm1->ReadBuf(buf_Com1_Inp,Count); // 17
    VaComm1->PurgeRead();
    Form1->Shape4->Brush->Color = clRed; return;
} */

}
int k = 0;
//-----
//обработка измерений
void obr_izm(void)
{
    int i,j;
    double kd;
    char buf_chis[10];
    char buf_chis1[10];
    if(buf_Com1_Inp[0] == 0x10){
        // k++;

        l.ch[0] = buf_Com1_Inp[2]; l.ch[1] = buf_Com1_Inp[1];
        tem_it = l.i[0];

        i = l.i[0]/2; j = l.i[0]%2;
        // Form1->Edit6->Text = AnsiString(k);
        itoa(i,buf_chis,10);
        strcat(buf_chis,"");
        if(j==0) strcat(buf_chis,"0");
        else strcat(buf_chis,"5");
        Form1->Edit2->Text = AnsiString(buf_chis);
    }
    if(buf_Com1_Inp[0] == 0x11 ){
        k++;
        // Form1->Edit6->Text = AnsiString(k);

        l.ch[0] = buf_Com1_Inp[2]; l.ch[1] = buf_Com1_Inp[1];
        i = l.i[0]; //j= l.c[0]%2;
        daw_it = l.i[0];
        itoa(i,buf_chis,10);

        // Form1->Edit4->Text = AnsiString(i);
        if(i < 500){
            kd = ((double)i*(double)k_k) + (double)k_b;
            // sprintf(buf_chis,"%f",kd);

            Form1->Edit1->Text = AnsiString(kd);

```

```

// i = floor(kd);
// itoa(i,buf_chis,10);

    }
else { strcpy(buf_chis,"0"); }

strcpy(buf_chis1,"-0."); strcat(buf_chis1,buf_chis);

/*strcat(buf_chis,".");
if(j==0) strcat(buf_chis,"0");
else strcat(buf_chis,"5"); */

// Form1->Edit1->Text = AnsiString(buf_chis1);
// Form1->Edit4->Text = AnsiString(i);
    }

for(i=0;i<10;i++)
buf_Com1_Inp[i] = 0x00;

}
//-----
//потеря синхронизации по таймеру
void __fastcall TForm1::Timer2Timer(TObject *Sender)
{
if(fl_syn == 1){
Form1->Shape4->Brush->Color = clRed;
}
fl_syn = 1;
}

//-----
// сохранение таблицы данных испытаний
void __fastcall TForm1::Button3Click(TObject *Sender)
{
char bf_im_file[50];

if(!(SaveDialog1->Execute()))return;

FNameSave = SaveDialog1->FileName;

strcpy(bf_im_file,FNameSave.c_str());
strcat(bf_im_file,".txt");

//Form1->Edit6->Text = AnsiString(bf_im_file);
save_rezult();
}

//-----
// запоминание результатов измерения
void save_rezult(void)

```

```

{

FILE *fp;
int i,j,k,m;
char nam_fil[50];
char strf[256];
char bf_ch[10];

strcpy(nam_fil,FINameSave.c_str());
strcat(nam_fil,".txt");
if(!(fp=fopen(nam_fil,"w"))){
    ShowMessage("ошибка открытия файла");
    return;
}
strcpy(strf,tab_temp[0]);strcat(strf," ");
strcat(strf,tab_dawl[0]);
fputs(strf,fp);
fputc(0x0d,fp);fputc(0x0a,fp);

for(i=1;i<360;i++){
    itoa(i,bf_ch,10);
    if(tab_temp[i][0] == 0) break;
    strcpy(strf,bf_ch);strcat(strf," ");strcat(strf,tab_temp[i]);strcat(strf," ");
    strcat(strf,bf_ch); strcat(strf," ");strcat(strf,tab_dawl[i]);

    fputs(strf,fp);
    fputc(0x0d,fp);fputc(0x0a,fp);
}
fclose(fp);

}
//-----
//запись результатов процесса
void __fastcall TForm1::Button12Click(TObject *Sender)
{

int i,j;
if(fix == 0){

    for(i= 0;i <380;i++)
        for(j= 0;j <20;j++){
            tab_temp[i][j] = 0; tab_dawl[i][j] = 0;
        }

    strcpy(tab_temp[0],"шаг Т = ");
    strcpy(tab_dawl[0],Form1->ComboBox1->Text.c_str());
    strcat(tab_dawl[0]," сек");
    T_cicl = atoi(Form1->ComboBox1->Text.c_str());
    chis_takt = T_cicl;
    fix = 1; uk_nt = 1;
    T_pr = atoi(Form1->Edit7->Text.c_str());
}

```

```
//приращение абцисса
```

```
ddx = Form1->Image1->Width/(T_pr/T_cicl);  
tek_xxx = 0; Y0_tem = 0,Y0_daw = 0;  
test_t = 40;test_d = 220;
```

```
Form1->Shape5->Brush->Color = clLime;
```

```
    }
```

```
else { fix = 0;
```

```
    Form1->Shape5->Brush->Color = clRed;
```

```
    }
```

```
}//-----
```


СОГЛАСОВАНО

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор по НР и МС

«ENRICO»

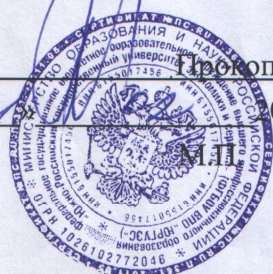
И.П. Рудик Н.Н.

Прокопенко Н.Н.

« 30 » 01 2013 г.

« 30 » 01 2013 г.

М.П.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских,

опытно-конструкторских и технологических работ

Заказчик «ENRICO» И.П. Рудик Н.Н.

(наименование организации, Ф.И.О. руководителя организации)

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов научной работы «Методология исследования и разработки процессов и оборудования для гигротермической обработки натуральных кож воздействием на их микроструктуру в условиях вакуума», выполненной к.т.н., профессором Лариной Л.В. на кафедре «Машины и оборудование бытового и жилищно-коммунального назначения» ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса».

1. Вид внедренных результатов: Разработка и внедрение в производство рекомендаций по использованию новых технологий и технических решений унифицированного оборудования для интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви с применением вакуума.

(эксплуатация изделия, работы, технологии; производства изделия)

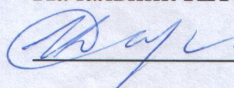
2. Характеристика масштаба внедрения единичное
(уникальное, единичное, партия, массовое, серийное)

3. Социальный и научно-технический эффект: повышение производительности обработки и снижение энергопотребления за счет модернизации технологий изготовления обуви и усовершенствования гигротермического оборудования.

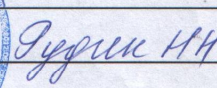
От ЮРГУЭС

От предприятия

Начальник НИО

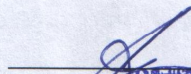
 Даниленко И.Н.



 Рудик Н.Н.

СОГЛАСОВАНО

Проректор по НИР

 Марчук В.И.

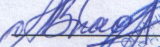
« 24 » 2011 года



УТВЕРЖДАЮ

ООО «Таурус»

Генеральный директор

 Владимиров А.В.

« 17 » 2011 года



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских,
опытно-конструкторских и технологических работ

Заказчик

(наименование организации, Ф.И.О. руководителя организации)

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов научной работы «Разработка универсальной вакуумной установки для интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви», выполненной по руководством к.т.н., доцент Лариной Л.В., аспирантом Смирновым В.В. на кафедре «Машины и аппараты бытового назначения» ГОУ ВПО Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, внедрены в

1. Вид внедренных результатов Способ гигротермической фиксации заготовок верха обуви на перфорированных колодках с одновременным вакуумированием с бахтармянной стороны и приложением давления с лицевой

(эксплуатация изделия, работы, технологии; производства изделия)

2. Характеристика масштаба внедрения единичное
(уникальное, единичное, партия, массовое, серийное)

3. Социальный и научно-технический эффект улучшение показателей физико-механических свойств заготовок верха обуви из кож хромового дубления и повышение производительности обработки

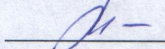
От ЮРГУЭС

От предприятия

Начальник НИО

 Даниленко И.Н.

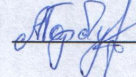
Руководитель НИР

 Ларина Л.В.

Исполнитель

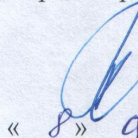
 Смирнов В.В.

Инженер ООО «Таурус»

 Горбунов А.В.

СОГЛАСОВАНО

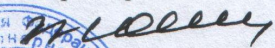
Первый проректор по НР и МС

«»
Прокopenko И.Н.
2013 года



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ЗАО

«Прогресс»
«»
Блатман Г.М.
2013 года
М.П.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских,

опытно-конструкторских и технологических работ

Заказчик

ЗАО «Прогресс»

(наименование организации,

Генеральный директор

Ф.И.О.

Блатман Г.М.

руководителя организации)

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов научной работы «Методология исследования и разработки процессов и оборудования для обработки натуральных кож гигротермическим воздействием на их микроструктуру в условиях вакуума», выполненную к.т.н., проф. Лариной Л.В., на кафедре «Машины и оборудование бытового и жилищно-коммунального назначения» ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса» в ЗАО «Прогресс».

1. Вид внедренных результатов Рекомендации по использованию новых технологий и технических решений унифицированного оборудования для интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви.
(эксплуатация изделия, работы, технологии; производства изделия)

2. Характеристика масштаба внедрения единичное
(уникальное, единичное, партия, массовое, серийное)

3. Социальный и научно-технический эффект улучшение показателей физико-механических свойств заготовок верха обуви из кож хромового дубления и повышение производительности обработки

От ЮРГУЭС

От предприятия

Начальник НИО

Главный технолог

Даниленко И.Н.

Рокотянская С.Н.

Исполнитель

Ларина Л.В.

**МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Южно-Российский государственный
университет экономики и сервиса»
(ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС»)



АКТ
о внедрении результатов докторской
диссертационной работы
Лариной Людмилы Васильевны

Комиссия в составе: председатель, проректор по УиНР, первый проректор, д.т.н., проф. каф. «МО» Петросов С.П.

Члены комиссии: начальник учебно-методического отдела Воронова Н.П., декан механико-радиотехнического факультета к.т.н., доц. Зибров В.А., к.т.н., проф. каф. «МО» Алёхин С.Н., составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы на тему «Методология исследования и разработки процессов и оборудования для обработки натуральных кож гигротермическим воздействием на их микроструктуру в условиях вакуума» представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, внедрены в научно-педагогическую практику Южно-Российского государственного университета экономики и сервиса в виде:

- учебного пособия «Расчет и проектирование гигротермического оборудования. Применение метода подобия функционирования технических систем» /LAP LAMBERT Academic.- 2012. 68 с.

Пособие используется студентами специальностей 260905 «Технология изделий из кожи», 260906 «Конструирование изделий из кожи» при изучении дисциплины «Оборудование производств изделий из кожи и основы проектирования оборудования», специальности 150408 БМП и направления 151000 ТМО при курсовом и дипломном проектировании, а также магистрантами и аспирантами при проведении научных исследований по соответствующему направлению.

Председатель комиссии

подпись

С.П. Петросов

Члены комиссии:

подпись

Н.П. Воронова

подпись

В.А. Зибров

подпись

С.Н. Алёхин

СОГЛАСОВАНО

Проректор по НИР


М.П. Марчук В.И.

« 2011 года



УТВЕРЖДАЮ

ИП Склад В.Я

Ген. дир. Склад В.Я



« 15 » апреля 2011 года



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских,
опытно-конструкторских и технологических работ

Заказчик

(наименование организации, Ф.И.О. руководителя организации)

Индивидуальный предприниматель Склад Валерий Яковлевич

Настоящим актом подтверждается, что результаты научной работы «Разработка универсальной вакуумной установки для интенсифицированной гигротермической обработки заготовок верха обуви», выполненной по руководством к.т.н., доцент Лариной Л.В., аспирантом Смирновым В.В. на кафедре «Машины и аппараты бытового назначения» ГОУ ВПО Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, внедрены в

1. Вид внедренных результатов Экспериментальная установка для интенсифицированного гигротермического воздействия на заготовки верха обуви с регулируемыми параметрами рабочей среды

(эксплуатация изделия, работы, технологии; производства изделия)

2. Характеристика масштаба внедрения единичное
(уникальное, единичное, партия, массовое, серийное)

3. Социальный и научно-технический эффект улучшение показателей физико-механических свойств заготовок верха обуви из кож хромового дубления и повышение производительности обработки

От ЮРГУЭС

От предприятия

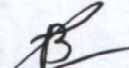
Начальник НИО

Даниленко И.Н. 

Руководитель НИР

Ларина Л.В.

Исполнитель

Смирнов В.В. 

З. Технолог

Шапкина С.В.

15.04.2011.

