

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 685.34.055.44

МАКАРЕНКО
ЕЛЕНА ФРАНЦЕВНА

**КОНВЕКТИВНАЯ УСТАНОВКА ПРОХОДНОГО ТИПА
ДЛЯ СУШКИ И ТЕРМОФИКСАЦИИ ОБУВИ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.13 – “Машины, агрегаты и процессы (легкая
промышленность) (технические науки)”

Витебск
2009

Работа выполнена в учреждении образования
«Витебский государственный технологический университет»

Научный руководитель:

Ольшанский Валерий Иосифович, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительного производства» учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Официальные оппоненты:

Сторожев Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машины и аппараты легкой промышленности» Московского государственного университета дизайна и технологии, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации.

Акулич Петр Васильевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной Академии Наук Республики Беларусь».

Оппонирующая организация:

Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие «Центр научных исследований лёгкой промышленности», г. Минск, Республика Беларусь.

Защита состоится 26 мая 2009 г. в 14.00 на заседании Совета по защите диссертаций К 02.11.01 в учреждении образования «Витебский государственный технологический университет» по адресу:

210035, г. Витебск, Московский проспект, д. 72, ауд. 210.

E-mail: vstu@vitebsk.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Автореферат разослан «___» _____ 2009 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций, кандидат технических наук, доцент

Г.В. Казарновская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Для Республики Беларусь проблемы энергосбережения и импортозамещения являются первостепенными задачами, что отражено в Указе Президента Республики Беларусь № 399 от 25.08.2005 г. и Государственной программе импортозамещения на 2006-2010 годы, разработанной Правительством Республики Беларусь.

Диссертационная работа посвящена актуальной проблеме – разработке конвективной сушильной установки проходного типа для сушки и термофиксации обуви, а так же созданию инженерных методов расчета и проектирования таких установок.

Проведенные исследования показывают, что выбор рациональных режимов и конструкции установки для сушки и термофиксации обуви позволяет снизить энергозатраты и разработать собственное сушильное оборудование. В результате разработаны методики проектирования основных конструктивных узлов сушильной установки проходного типа. Разработана конструкция и изготовлен опытно-промышленный образец конвективной сушильной установки проходного типа. Получены аналитические зависимости основных параметров тепломассопереноса, которые позволяют рассчитать оптимальные режимы термофиксации и сушки многослойных пакетов обувных материалов.

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Диссертационная работа выполнялась в соответствии:

– с государственной программой научных исследований на 2001-2005 годы по заданию «Создать высокоэффективную сушильную установку проходного типа для скоростной сушки обуви» (Сушка 19), срок выполнения с 2.01.2004 г. по 31.12.2005 г., № ГР 20042283;

– государственной комплексной программой научных исследований на 2006-2010 годы по заданию «Разработка энергоэффективных технологий и оборудования для скоростной сушки кожевенно-обувных материалов» (Тепловые процессы 79), срок выполнения с 2.01.2006г. по 31.12.2008г., № ГР 20062379;

– научно-исследовательской работой по заданию Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по теме «Исследование теплофизических характеристик материалов легкой промышленности» (срок выполнения с 1.04.2006 г. по 30.06.2008 г.) № ГР 20064370;

– научно-исследовательской работой по заданию Министерства образования Республики Беларусь по теме «Разработка инженерных методов

расчета основных режимов процесса сушки пакета многослойных материалов» (срок выполнения с 2.01.2007 г. по 31.12.2007 г.) № ГР 20071039;

– научно-исследовательской работой по заданию Министерства образования Республики Беларусь по теме «Исследование процессов влажно-тепловой обработки изделий легкой промышленности» (срок выполнения с 2.01.2008 г. по 31.12.2008 г.) № ГР 20081470;

– научно-исследовательской работой кафедры «Технология и оборудование машиностроительного производства» УО «ВГТУ» ВПД-047 «Разработка ресурсо-энергосберегающего оборудования технологических процессов, оснастки производственных процессов и систем для машиностроения, легкой и текстильной промышленности», утвержденную НТК УО «ВГТУ» (протокол № 5 от 15.11.2005 г.).

Цель и задачи исследований

Целью диссертационной работы является разработка энергоэффективной конвективной установки для сушки и термофиксации обуви.

В соответствии с указанной целью были поставлены следующие задачи:

– разработать структурную схему сушильной установки и спроектировать ее основные узлы;

– создать экспериментальную конвективную установку проходного типа для сушки и термофиксации обуви;

– исследовать процесс конвективной сушки обуви и разработать методы расчета основных режимных параметров влаготеплообмена при сушке влажных пакетов обувных материалов;

– определить рациональные технологические режимы сушки обувной заготовки и провести промышленную апробацию опытного образца конвективной сушильной установки проходного типа на обувном предприятии.

Объектом исследований является конвективная установка проходного типа для сушки и термофиксации обуви. *Предметом исследований* являются режимные параметры влаготеплообмена при сушке обуви.

Положения, выносимые на защиту

Энергоэффективная установка проходного типа для сушки и термофиксации обуви, применение которой обеспечивает снижение энергозатрат и выпуск отечественного оборудования, соответствующего лучшим импортным аналогам.

Методики расчета тепловой мощности и аэродинамических характеристик конвективных сушильных установок, позволяющие разработать их основные узлы и на стадии проектирования объективно оценить все тепловые и аэродинамические потери, возникающие в процессе работы таких установок, что позволит интенсифицировать процесс сушки обуви и обеспечит создание нового энергоэффективного оборудования.

Математическая модель изменения среднеобъемной температуры влажного пакета обувных материалов, обеспечивающая прогнозирование распределения температурного поля во времени в процессе сушки.

Аналитические зависимости относительного теплового потока, времени сушки, среднеобъемной температуры и теплопроизводительности установки по испаренной влаге, позволяющие получить исходные данные на проектирование энергоэффективной сушильной установки.

Личный вклад соискателя

Результаты диссертационной работы, сформулированные в защищаемых положениях и выводах, отражают личный вклад соискателя.

Соискателем лично:

- обоснован выбор оптимальной конструкции технологического оборудования для сушки обуви и выбор способа сушки;
- определены исходные данные на проектирование сушильной установки, разработана принципиальная схема и спроектированы основные узлы сушильной установки проходного типа;
- разработан экспериментальный стенд и осуществлен выбор пакета обувных материалов для исследования распределения полей влагосодержания и температуры в многослойном пакете материалов в процессе сушки;
- проведены исследования кинетики сушки многослойных пакетов обувных материалов методом математического планирования двухфакторного эксперимента и определен диапазон основных режимных параметров сушки обуви;
- получена математическая модель распределения среднеобъемной температуры влажного пакета обувных материалов в процессе сушки;
- определено влияние режимных параметров сушки на технологические и потребительские свойства обуви, определены рациональные технологические режимы термообработки обувной заготовки, на основании закономерностей распределения полей влагосодержания;
- получены аналитические зависимости для определения полной длительности процесса сушки и среднеобъемной температуры многослойного пакета материалов;
- проведены испытания опытно-промышленного образца конвективной сушильной установки проходного типа для сушки и термофиксации обуви, затянутой на колодку, в производственных условиях ЭОП УО «ВГТУ».

Апробация результатов диссертации

Основные результаты работы представлены и получили положительную оценку: на XXXVIII – XLI научно-технических конференциях преподавателей и студентов УО «ВГТУ» (Витебск, 2005-2008 гг.); международной научной конференции «Актуальные проблемы науки, техники и экономики

производства изделий из кожи» (Витебск, 2004 г.); международной научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Молодежь – производству» (Витебск, 2006 г.); межвузовской научно-практической конференции «Инновационные и наукоемкие технологии в легкой промышленности» (Москва, 2008 г.); заседаниях кафедр ТиОМП и МАЛП УО «ВГТУ», 2005-2008 гг.; заседании проблемного совета УО «ВГТУ» по специальности 05.02.13, 27.02.2009 г.

Промышленная апробация результатов диссертационных исследований осуществлена на обособленном структурном подразделении «Экспериментально-опытное предприятие УО «ВГТУ»; в учебный процесс УО «ВГТУ».

Опубликованность результатов диссертации

По материалам диссертации опубликованы 23 печатные работы общим объемом 5,1 авторских листа, в том числе 14 статей (9 статей общим объемом 2,8 авторских листа в научных изданиях, включенных в перечень изданий, утвержденных ВАК РБ) и 6 тезисов докладов. Получен патент на полезную модель «Установка проходного типа для термофиксации и сушки обуви» (пат. № 3357 РБ : МПК7 А 43 D 95/10 / Е.Ф. Макаренко, В.И. Ольшанский, А.А. Угольников, А.И. Ольшанский, Ю.Е. Махаринский; заявитель и патентообладатель УО «ВГТУ». – № и 20060355; заявл. 02.06.2006 г.; опубл. 15.11.2006 г.). Получен патент на полезную модель «Установка для термофиксации и сушки обуви» (пат. № 3272 РБ : МПК7 А 43 D 95/10 / Е.Ф. Макаренко, С.А. Щеглов, А.А. Угольников, В.И. Ольшанский; заявитель и патентообладатель УО «ВГТУ». – № и 20060379; заявл. 09.06.2006 г.; опубл. 02.10.2006 г.). Получен патент на полезную модель «Конвективно-радиационная установка проходного типа для термофиксации и сушки обуви» (пат. № 3986 РБ : МПК(2006) А 43 D 95/00 / Е.Ф. Макаренко, А.А. Угольников, В.И. Ольшанский; заявитель и патентообладатель УО «ВГТУ». – № и 20070221; заявл. 28.03.2007 г.; опубл. 01.08.2007 г.).

Структура и объем диссертации

Работа содержит введение, общую характеристику работы, четыре главы, заключение, библиографический список и приложения. Общий объем работы составляет 215 страниц. Объем, занимаемый рисунками, таблицами и приложениями, включающий 43 рисунка, 16 таблиц и 21 приложение, изложен на 108 страницах. В работе использовано 130 библиографических источников, список которых изложен на 11 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определена основная цель исследований, отражены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе, основываясь на монографиях, научных работах, патентных материалах, информации выставок и других источниках, проведен анализ существующих способов и конструкций сушильного оборудования. Проанализировано современное высокопроизводительное оборудование ведущих мировых производителей и технологический процесс производства обуви.

Совместно с Ольшанским В.И., Водневым С.В., Матвеевым В.Л. [2, 19] проведен анализ технических характеристик современного сушильного оборудования, который показал, что отечественные установки, выпускаемые до 90-х г., значительно уступают по своим техническим характеристикам современным импортным установкам для сушки и термофиксации обуви. В настоящее время сушильное оборудование на территории стран СНГ не выпускается и предприятия вынуждены закупать дорогостоящее импортное оборудование, отличающееся компактностью, высокой производительностью при низком энергопотреблении, обеспечивающее высокое качество обработки.

На основе анализа существующих конструкций сушильных установок, совместно с Ольшанским В.И., Угольниковым А.А., Щегловым С.В. разработаны и запатентованы экспериментальные конструкции сушильных установок: установка для конвективной сушки с использованием эффекта вакуума [21], конвективно-радиационная установка [23]. Данные установки позволяют оптимизировать процесс сушки, однако создание компактных сушильных установок проходного типа является затруднительным, поскольку проходное сечение камеры для создания эффекта вакуума должно быть цилиндрическим, а возможные конструктивные решения приводят к значительному удорожанию установок.

При проектировании новых сушильных установок необходимо стремиться к минимальной энергоемкости, минимальным габаритным размерам, сокращению времени сушки обуви и, в то же время, увеличению производительности при обеспечении высокого качества обрабатываемого материала. Поэтому возникает необходимость в установлении комплексного критерия, позволяющего оценить энергоэффективность сушильной установки. Оценку энергоэффективности предлагается производить в виде приведенных затрат на единицу продукции (кВт·час) с помощью следующего соотношения:

$$\mathcal{E}_n = \frac{P}{\Pi}, \quad (1)$$

где P – установленная мощность оборудования, кВт; Π – производительность, пар/час.

Анализ 20 установок ведущих европейских производителей сушильного оборудования показал, что наиболее энергоэффективными сушильными установками являются те, у которых приведенные энергозатраты на единицу продукции $E \leq 0,07$ кВт·час [6].

Наиболее применяемым в настоящее время является конвективный способ сушки. Этот способ сушки является простым, эффективным и экономически целесообразным с точки зрения изготовления оборудования. Разработка принципиально новой конструкции сушильной установки и интенсификация процесса сушки за счет рациональных режимных параметров позволит создать энергоэффективную сушильную установку проходного типа для сушки и термофиксации обуви [18].

Вторая глава посвящена проектированию энергосберегающей конвективной сушильной установки проходного типа [15].

На основании анализа современного высокопроизводительного оборудования для сушки обуви и работы с литературными источниками по определению режимов сушки, определены исходные данные на проектирование конвективной сушильной установки проходного типа.

Совместно с Ольшанским В.И., Угольниковым А.А., Ольшанским А.И. и Махаринским Ю.Е. [22] разработана принципиальная схема расположения всех узлов в проектируемой сушильной установке проходного типа (рисунок 1). В данной установке применена профилированная камера (рисунок 2), позволяющая направлять тепловой поток на самую увлажненную часть обувной заготовки (носочно-пучковую). На данную разработку получен патент на полезную модель Республики Беларусь.

Произведен расчет привода пластинчатого конвейера проектируемой установки.

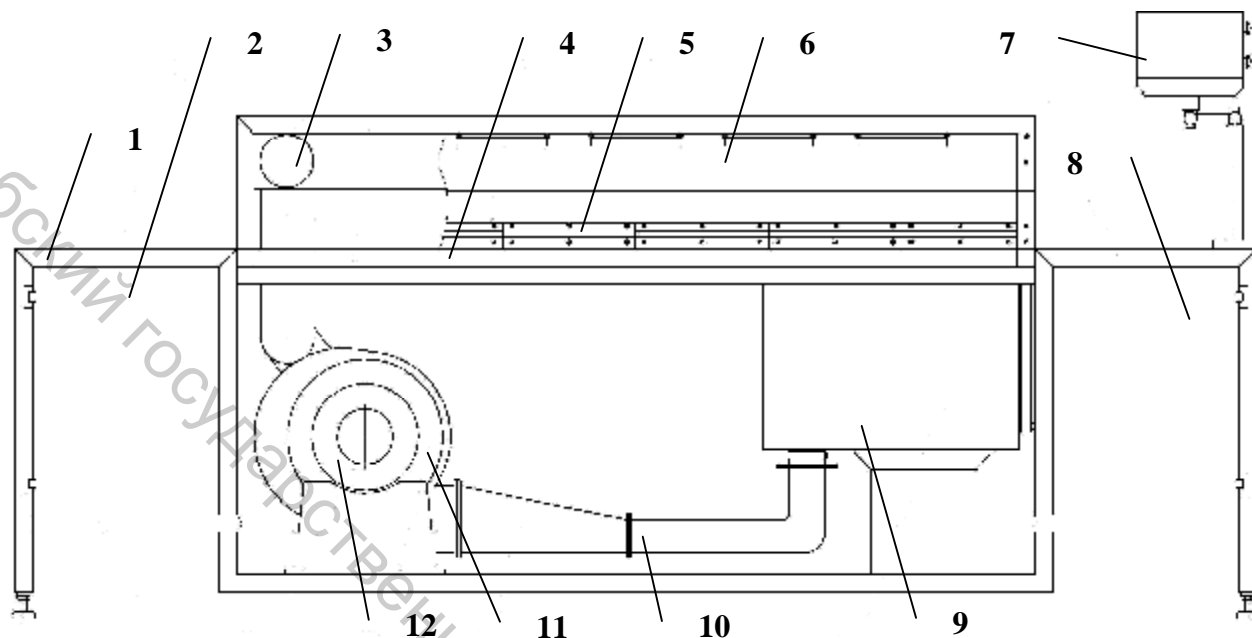
Разработана методика расчета тепловой мощности сушильной установки проходного типа с учетом тепловых потерь, которые определяются из выражения

$$Q_{сушки} = Q_{об} + Q_{вл} + Q_{кол} + Q_5, \quad (2)$$

где $Q_{об}$, $Q_{вл}$ и $Q_{кол}$ – расход тепла на испарение влаги, нагрев материала заготовок обуви и колодок, кВт; Q_5 – потери тепла в окружающую среду, кВт.

Совместно с Ольшанским В.И., Ольшанским А.И. [3, 10] произведен тепловой расчет сушильной установки проходного типа, суммарные потери

тепла составили 8,01 кВт. По результатам расчета разработана схема калорифера проектируемой сушильной установки. Установлено, что в калорифере необходимо разместить 6 трубчатых электронагревателей (ТЭН) по 1,5 кВт, что составит 9 кВт суммарной мощности.



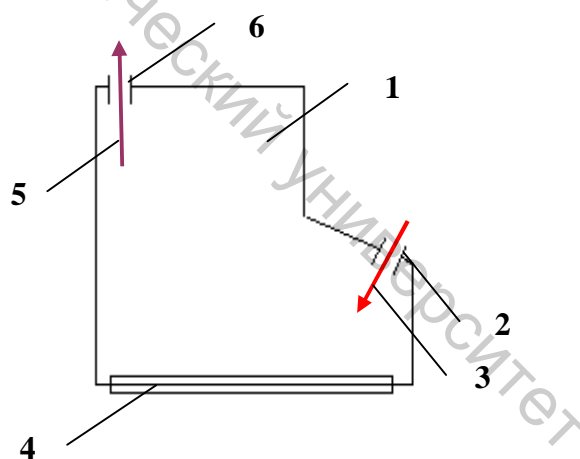
- 1 – рама; 2 – шкаф с приводом конвейера; 3 – труба рециркуляции; 4 – конвейер; 5 – сопловая щель; 6 – сушильная камера; 7 – панель управления; 8 – шкаф с электрооборудованием; 9 – калорифер; 10 – труба вентиляции; 11 – вентилятор; 12 – двигатель вентилятора

Рисунок 1 – Принципиальная схема конвективной сушильной установки проходного типа

Исходя из компоновки основных узлов (рисунок 1) и требуемых габаритных размеров проектируемой установки, разработана схема движения воздуха (рисунок 3) с учетом минимальных потерь напора по всей длине пневмомагистрали.

Разработана методика расчета аэродинамических характеристик установок для сушки обуви при конвективном подводе тепла.

Выбор вентилятора для подачи воздуха в сушильную камеру обуславливается



- 1 – камера; 2 – сопловая щель; 3 – горячий воздух; 4 – конвейер; 5 – отработанный воздух; 6 – воздуховод рециркуляции

Рисунок 2 – Профиль камеры установки

необходимой подачей воздуха Q_V (м³/час) и создаваемым давлением P_g (Па):

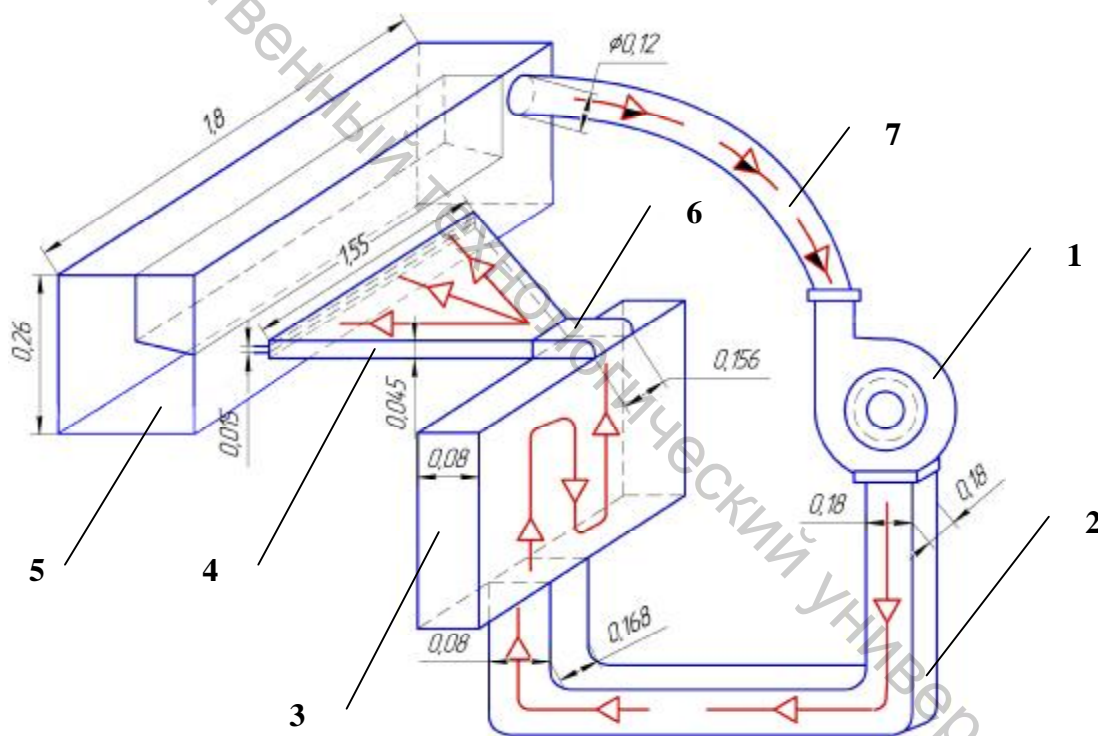
$$Q_V = u_{кам} w_{кам} , \quad (3)$$

где $u_{кам}$ – скорость воздуха в камере, м/с; $w_{кам}$ – площадь проходного сечения камеры, м².

$$P_g = P_d + \sum \Delta P , \quad (4)$$

где P_d – динамическое давление в сушильной камере, Па; $\sum \Delta P$ – общие потери давления, Па.

На основании схемы движения воздуха (рисунок 3) произведен расчет объемного расхода $Q_V = 2088$ (м³/час) и необходимого давления воздуха $P_g = 637,5$ (Па). По полученным значениям этих параметров осуществлен выбор вентилятора сушильной установки.



- 1 – вентилятор; 2 – воздуховод; 3 – калорифер; 4 – диффузор; 5 – сушильная камера;
6 – выход из калорифера; 7 – воздуховод рециркуляции

Рисунок 3 – Схема движения воздушных потоков в сушильной установке

Разработана система управления сушильной установки пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования, которая позволяет удерживать температуру в сушильной камере с точностью 1...2 °С и обеспечивает надёжную защиту от выхода из строя нагревательных элементов.

Третья глава посвящена исследованию процесса сушки многослойных пакетов обувных материалов на сушильной установке. Целью исследований являлось определение влияния режимных параметров при конвективной сушке на технические и потребительские свойства обуви.

Обувная заготовка представляет собой многослойную конструкцию, состоящую из материалов, свойства которых значительно отличаются друг от друга. Для экспериментальных исследований были изготовлены различные типы пакетов обувных материалов, применяемых при изготовлении обуви специального назначения. Состав многослойного пакета материалов, применяемого для производства обуви специального назначения, обладающий наибольшим термическим сопротивлением (кожтовар юфть 2с, термопласт, бязь термоклеевая, трикотажное полотно) позволяет определить максимальные значения теплового потока, скорости воздушного потока и температуры для проектирования универсальной установки проходного типа для сушки и термофиксации обуви всех типов.

Совместно с Ольшанским В.И., Ольшанским А.И. [12] определено термическое сопротивление теплопередачи экспериментального пакета материалов: $R = 0,19 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$. Исходя из рассчитанного термического сопротивления, определен расход тепла на нагрев обувной заготовки: $Q_{o.з.} = 0,38 \dots 0,63 \text{ кВт}$ (при температуре сушки в диапазоне $t = 80 \dots 120 \text{ }^\circ\text{C}$).

Экспериментальные исследования проводились на опытной сушильной установке (рисунок 1) для предварительно увлажненных образцов при температурах воздушного потока $t = 80 \dots 110 \text{ }^\circ\text{C}$, скорости воздушного потока $v = 5 \dots 10 \text{ м/с}$. В процессе эксперимента образцы материалов высушивались до равновесной влажности $u = 0,10 \dots 0,12$. На основании экспериментальных данных получены кривые сушки $u = f(t)$ (рисунок 4) и температурные кривые $\bar{t} = f(t)$.

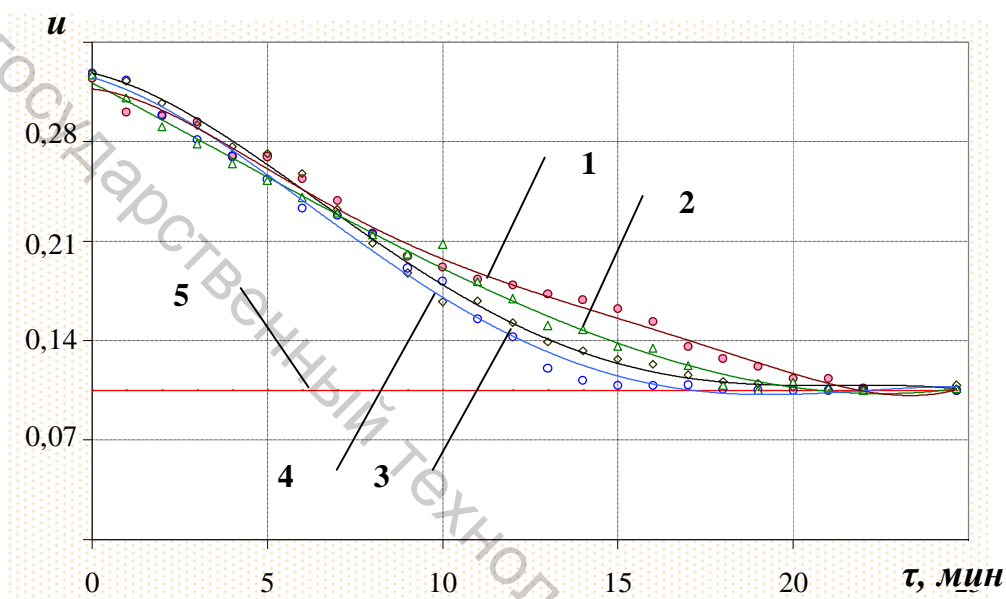
Для дальнейшего анализа экспериментальных данных и определения области рациональных режимов сушки использовался метод математического планирования эксперимента. В качестве входных факторов были выбраны x_1 – температура сушки $t_c \text{ (}^\circ\text{C)}$ и x_2 – скорость воздуха $v \text{ (м/с)}$. В качестве выходных параметров исследованы y_1 – продолжительность процесса сушки $\tau \text{ (мин)}$ и y_2 – величина удельного теплового потока $q \text{ (Вт/м}^2\text{)}$.

В результате получены следующие математические модели зависимости выходных параметров от входных факторов:

$$y_1 = 14,78 - 2,00 \cdot x_1 - 2,50 \cdot x_2 + 0,50 \cdot x_1 \cdot x_2 + 4,33 \cdot x_1^2 + 0,83 \cdot x_2^2; \quad (5)$$

$$y_2 = 203,67 - 21,83 \cdot x_1 + 53,00 \cdot x_2 - 6,00 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (6)$$

По регрессионным моделям построены графические интерпретации параметров процесса: времени сушки и величины теплового потока. Используя метод наложения линий равного уровня поверхностей отклика полученных моделей, определена область компромиссных решений, характеризующая наиболее оптимальные соотношения режимов для получения рациональных значений времени сушки и величины теплового потока. Установлен диапазон рациональных режимных параметров для сушки пакета материалов обуви специального назначения: скорость воздушного потока от 7 до 10 м/с; температура воздуха в сушильной камере от 88 до 98 °С; время сушки от 13 до 15 мин, величина удельного теплового потока от 205 до 245 Вт/м² [5].



Температура сушки: 1 – 80 °С; 2 – 110 °С; 3 – 100 °С; 4 – 90 °С; 5 – $u = 0,12$

Рисунок 4 – Кривые сушки многослойных пакетов обувных материалов при $v=5$ м/с

Для установления аналитических зависимостей времени сушки и теплового потока от основных режимных параметров при конвективной сушке выполнены исследования закономерностей протекания процессов тепломассопереноса.

Четвертая глава посвящена определению рациональных режимов конвективной сушки обувного пакета многослойных материалов.

Совместно с Ольшанским А.И., Ольшанским В.И. [7, 14] проведены исследования распределения температурного поля по толщине многослойного пакета материалов в процессе термообработки при воздействии различных тепловых потоков, для предотвращения коробления и трещинообразования верха обуви. Результаты экспериментальных исследований показали, что для пакетов материалов обуви специального назначения увеличение теплового потока выше 0,8 кВт/м² нецелесообразно, поскольку приводит к перерасходу энергии и

появлению трещин. Следовательно, при проектировании сушильной установки необходимо обеспечить воздействие удельного теплового потока равного $q_{\max} \leq 0,8 \text{ кВт/м}^2$.

Совместно с Ольшанским В.И., Ольшанским А.И. [1, 11], используя известные критериальные уравнения, проведены исследования по выявлению влияния режимных параметров на величину теплового потока в первом периоде сушки. Результаты расчета показали, что максимальный тепловой поток q_{\max} в первом периоде сушки достигается при $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ и $v = 10 \text{ м/с}$, увеличение температуры не приводит к увеличению мощности теплового потока.

Совместно с Ольшанским А.И., Ольшанским В.И. [4, 20] проведены теоретические исследования закономерностей кинетики сушки многослойных материалов для верха обуви во втором периоде сушки. С целью упрощения расчетов и получения зависимости по определению времени сушки во втором периоде t_{II} , проведен ряд аналитических преобразований уравнения баланса энергии и влаги для периода убывающей скорости сушки. В результате проведенных исследований получена новая аналитическая зависимость, позволяющая определить время сушки во втором периоде в зависимости от текущего и критического влагосодержания:

$$t_{II} = -\frac{1}{aN} \ln(1 - a(u_{кр} - \bar{u})), \quad (7)$$

где a – постоянная, определяемая экспериментально; N – скорость сушки в первом периоде, 1/с; $u_{кр}$ и \bar{u} – критическое и текущее влагосодержание материала.

Достоверность аналитической зависимости (7) подтверждена сравнением расчетных данных с экспериментальными, отклонение не превышает 5 %.

Анализ температурных кривых $\bar{t} = f(t)$, полученных в результате эксперимента на сушильной установке (рисунок 1), показывает, что все они имеют общую закономерность (рисунок 5), которую можно выразить в виде дробно-рациональной функции:

$$\bar{t}(t) = \frac{t}{a_0 + a_1 \cdot t} + a_2, \quad (8)$$

где $\bar{t}(t)$ – текущее значение среднеобъемной температуры многослойного пакета материалов как функция времени, $^\circ\text{C}$; t – время, мин; a_0 (мин/ $^\circ\text{C}$), a_1 (1/ $^\circ\text{C}$), a_2 ($^\circ\text{C}$) – параметры модели.

Параметры математической модели (8) определяются следующим образом:

$$a_0 = \frac{1}{\operatorname{tg} a} = \frac{t'}{t' - t_0}, \quad (9)$$

$$a_1 = \frac{1}{t_{\max} - t_0}, \quad (10)$$

$$a_2 = \bar{t}(t \rightarrow 0) = t_0, \quad (11)$$

где t' – время сушки соответствующее окончанию первого периода сушки, мин (критическая точка); t' – значение среднеобъемной температуры в критической точке, $^{\circ}\text{C}$; t_0 и t_{\max} – значение начальной и максимальной температуры пакета материалов, $^{\circ}\text{C}$ (рисунок 5).

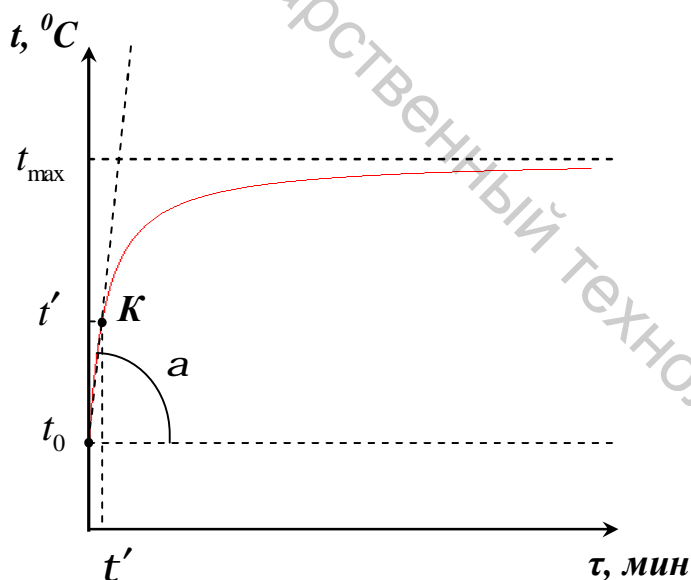


Рисунок 5 – Схематическое представление температурной кривой

Зависимость (8) позволяет построить распределение температурного поля во времени [16].

Совместно с Ольшанским В.И., Ольшанским А.И. [9, 13] произведена оценка аналитического решения уравнений баланса энергии и влаги различных авторов с привлечением обобщенных закономерностей кинетики сушки, основанных на экспериментальных данных. Разработаны аналитические

зависимости для определения полной длительности процесса сушки $t_{\text{полн}}$, среднеобъемной температуры многослойного пакета материалов в любой момент сушки \bar{t} , величины относительного теплового потока в любой момент сушки $q^* = q_{II} / q_I$ и производительности установки по испаренной влаге W .

Общая продолжительность процесса сушки $t_{\text{полн}}$ и температура материала в процессе сушки \bar{t} , в пределах от \bar{u}_0 до заданного текущего \bar{u} , определяется выражениями:

$$t_{полн} = \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N} \left(1 - \frac{1}{m} \ln \left(1 - m \frac{\bar{u}_{кр} - \bar{u}}{\bar{u}_0 - \bar{u}} \right) \right), \quad (12)$$

$$\bar{t} = t_c - \frac{A r}{c m} (\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) \exp(-m t^*), \quad (13)$$

где \bar{u}_0 – начальное влагосодержание материала; m – постоянная, определяемая экспериментально; r – теплота парообразования, кДж/кг; t_c – температура сушки, $^{\circ}\text{C}$; c – теплоемкость влажного материала, кДж/(кг $\cdot^{\circ}\text{C}$); $t^* = t_{II} / t_I$ – относительное время сушки.

Коэффициент A , характеризующий свойства конкретного материала, не зависит от режимных параметров процесса сушки и определяется выражением

$$A = C \exp\left(n(\bar{u}_{кр} - \bar{u})\right), \quad (14)$$

где C и n – постоянные, зависящие от свойств материалов.

При обработке экспериментальных данных получены следующие значения постоянных для многослойного пакета обувных материалов: $C = 0,2$; $n = 2$.

Для определения величины относительного теплового потока получена зависимость

$$q^* = (1 + A) \frac{(t_c - \bar{t}) c m}{(\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) A r}. \quad (15)$$

Путем совместного решения уравнений теплообмена, теплового баланса и баланса влаги получено уравнение для определения производительности сушильных установок по испаренной влаге:

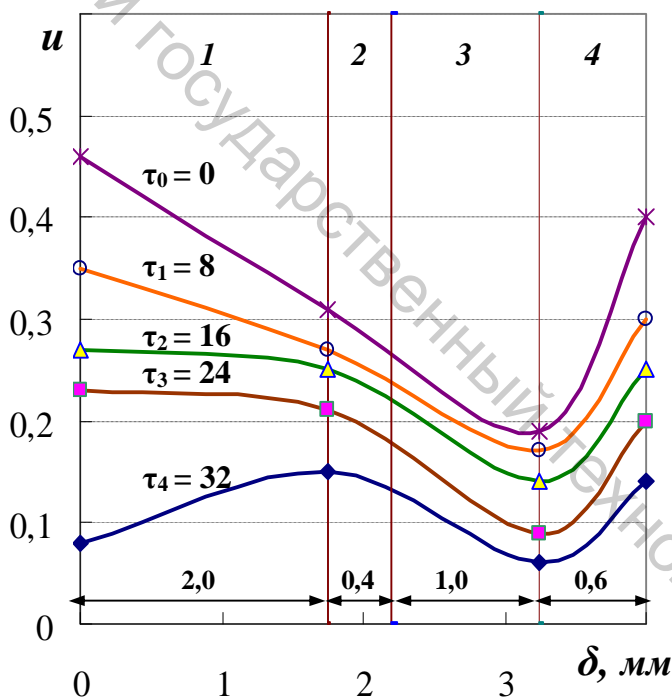
$$W = h \frac{M_{воз} c_p}{r} (t_1 - t_2) [1 + \exp(-m t^*) (1 + A)], \quad (16)$$

где h – коэффициент полезного действия сушильной камеры; $M_{воз}$ – массовый расход воздуха, кг/с; c_p – теплоемкость воздуха, кДж/(кг $\cdot^{\circ}\text{C}$); t_1 и t_2 – температуры теплоносителя на входе и выходе из установки, $^{\circ}\text{C}$.

При использовании полученных аналитических зависимостей упрощаются расчеты основных параметров процесса сушки многослойных материалов. Упрощение расчетов связано с тем, что для определения параметров необходимо найти критическое влагосодержание и скорость сушки в первый

период, что достаточно просто определить при проведении кратковременного эксперимента.

В процессе сушки обуви важно добиться таких режимных параметров, которые обеспечивают не только интенсификацию процесса, но и качественные показатели верха обуви, такие как отсутствие коробления и трещинообразования, хорошую формоустойчивость. Для этого совместно с Ольшанским В.И., Ольшанским А.И., Ковчуром С.Г. [8] выполнены исследования распределения полей влагосодержания по толщине пакета многослойных обувных материалов для различных режимов сушки (рисунок 6).



1 – юфть; 2 – термобязь; 3 – термопласт; 4 – трикотаж
Рисунок 6 – Распределение влагосодержания по толщине пакета многослойных обувных материалов

В результате обработки экспериментальных данных получены максимальные значения критерия Кирпичева $(Ki_m)_{\max} \approx 1,42$, что позволило установить рациональные параметры процесса сушки многослойного пакета материалов обувного специального назначения: скорость воздушного потока 5 м/с, температура воздуха 90 °С.

Исследования показали, что при значениях критерия Кирпичева равного 2, происходит разрушение многослойного пакета материалов, коробление и трещинообразование верхнего слоя образцов. Следовательно,

для обеспечения качества многослойных материалов в процессе сушки необходимо обеспечить режимные параметры, при которых $(Ki_m)_{\max} < 2$.

На предприятии РУНПП «Витебский завод радиодеталей» изготовлен опытно-промышленный образец сушильной установки проходного типа [17].

Разработанная сушильная установка успешно прошла промышленные испытания в производственных условиях ЭОП УО «ВГТУ». Ожидаемый экономический эффект от внедрения установки в ценах на июнь 2008 г. составил 49168,855 тыс. руб. Таким образом решена поставленная задача создания энергоэффективного импортозамещающего оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основе анализа существующего высокопроизводительного сушильного оборудования установлен критерий энергоэффективности установок для сушки обуви, позволивший определить оптимальные приведенные затраты на единицу продукции – как показатель для проектирования эффективного оборудования. Разработаны конструкции: конвективной сушильной установки проходного типа, установки для конвективной сушки с использованием эффекта вакуума, конвективно-радиационной установки [2, 6, 18, 19, 21, 23].

2. Разработаны методики расчета тепловой мощности и аэродинамических характеристик установок проходного типа для сушки обуви, позволяющие спроектировать энергосберегающую, высокоэффективную сушильную установку. Разработаны основные узлы сушильной установки, произведен выбор электродвигателя для привода пластинчатого конвейера, рассчитана тепловая мощность установки, произведен выбор вентилятора для проектируемой установки, что позволило спроектировать энергоэффективную сушильную установку проходного типа [3, 10, 15, 17, 22].

3. Исследован многослойный пакет обувных материалов на устойчивость к воздействию теплового потока и произведен расчет теплового сопротивления, что позволило определить расход тепла на нагрев обувной заготовки [7, 12, 14].

4. Методом математического планирования многофакторного эксперимента получены уравнения регрессии и проведена оптимизация режимных параметров процесса сушки многослойных обувных пакетов материалов, что позволило определить диапазоны скорости воздушного потока (от 7 до 10 м/с) и температуры воздуха в сушильной камере (от 88 до 98 °С), обеспечивающие минимальное время сушки (от 13 до 15 мин) и оптимальную величину удельного теплового потока (от 205 до 245 Вт/м²) [5].

5. Получена аналитическая зависимость времени сушки от влагосодержания, которая позволяет на стадии проектирования определять продолжительность процесса сушки во втором периоде. На основании расчета критерия Кирпичева определено влияние режимных параметров сушки на технологические и потребительские свойства пакета обувных материалов, обеспечивающие качественную термообработку обуви [1, 4, 8, 11, 20].

6. Получена математическая модель распределения среднеобъемной температуры влажного пакета обувных материалов в процессе сушки, позволяющая по значению текущей температуры в первый период сушки и максимальной температуре пакета получить зависимость температуры от времени в течение всего процесса сушки [16].

7. Разработаны аналитические зависимости для расчета среднеобъемной температуры многослойного пакета материалов, величины относительного теплового потока в любой момент сушки, продолжительности процесса сушки и производительности установки по испаренной влаге, позволяющие на стадии проектирования определять основные параметры процесса сушки сложных многослойных материалов [9, 13].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработана новая конвективная сушильная установка проходного типа для сушки и термофиксации обуви, затянутой на колодку. Установка может использоваться на обувных предприятиях Республики Беларусь. По техническим характеристикам разработанная установка отвечает требованиям, предъявляемым к современным сушильным установкам проходного типа.

2. Перспективность использования разработанной установки подтверждается опытной апробацией промышленного образца сушильной установки проходного типа в производственных условиях ЭОП УО «ВГТУ». Экономический эффект от внедрения сушильной установки в производство в ценах на июнь 2008 г. составил 49168,855 тыс. руб., о чем имеется соответствующий документ.

3. Результаты работы внедрены в учебный процесс УО «ВГТУ» (курсы «Машины и агрегаты легкой промышленности», «Основы энергосбережения», «Теплотехника»), о чем имеются соответствующие акты.

4. На разработанные конструкции сушильных установок получены патенты Республики Беларусь.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи:

1. Макаренко, Е.Ф. Кинетика процесса скоростной сушки материалов верха обуви / Е.Ф. Макаренко, В.И. Ольшанский, А.И. Ольшанский // Вестник учреждения образования «Витебский государственный технологический университет» / УО «ВГТУ»; гл. ред. С.М. Литовский. – 2004. – Вып. 6. – С. 69–73.
2. Матвеев, В.Л. Совершенствование технологии фиксации формы обуви и конструкции установок сушки / В.Л. Матвеев, В.И. Ольшанский, Е.Ф. Макаренко // Вестник учреждения образования «Витебский государственный технологический университет» / УО «ВГТУ»; гл. ред. В.С. Башметов. – 2005. – Вып. 9. – С. 52–54.
3. Ольшанский, А.И. Тепловой баланс и производительность сушильной установки с сопловым обдувом для скоростной сушки обуви / А.И. Ольшанский, В.И. Ольшанский, Е.Ф. Макаренко // Вестник учреждения образования «Витебский государственный технологический университет» / УО «ВГТУ»; гл. ред. В.С. Башметов. – 2006. – Вып. 10. – С. 27–31.
4. Ольшанский, А.И. Некоторые закономерности кинетики сушки влажных материалов / А.И. Ольшанский, В.И. Ольшанский, Е.Ф. Макаренко // Инженерно-физический журнал. – Минск, 2007. – Т. 80, № 4. – С. 143–146.
5. Макаренко, Е.Ф. Анализ изменения температуры в процессе сушки влажного пакета обувных материалов / Е.Ф. Макаренко // Вестник учреждения образования «Витебский государственный технологический университет» / УО «ВГТУ»; гл. ред. В.С. Башметов. – 2007. – Вып. 12. – С. 14–17.
6. Макаренко, Е.Ф. Интенсификация технологического процесса сушки обуви. / Е.Ф. Макаренко // Вестник учреждения образования «Витебский государственный технологический университет» / УО «ВГТУ»; гл. ред. В.С. Башметов. – 2007. – Вып. 13. – С. 120–124.
7. Макаренко, Е.Ф. Метод расчета кривой скорости сушки. / Е.Ф. Макаренко, В.И. Ольшанский, А.И. Ольшанский // Вестник учреждения образования «Витебский государственный технологический университет» / УО «ВГТУ»; гл. ред. В.С. Башметов. – 2008. – Вып. 15. – С. 130–134.
8. Макаренко, Е.Ф. Анализ процесса кинетики сушки обувных капиллярнопористых материалов / Е.Ф. Макаренко, А.И. Ольшанский, С.Г. Ковчур, В.И. Ольшанский // Известия НАН Республики Беларусь, серия физико-технических наук; редкол.: С.А. Астапчик [и др.]. – Минск, 2008. – № 2. – С. 17–19.
9. Ольшанский, А.И. Некоторые закономерности кинетики влаготеплообмена при сушке влажных материалов / А.И. Ольшанский, Е.Ф.

Макаренко, В.И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. – Минск, 2008. – Т. 81, № 6. – С. 1102–1110.

Материалы конференций:

10. Макаренко, Е.Ф. Расчет теплопроизводительности сушильных установок проходного типа / Е.Ф. Макаренко, В.И. Ольшанский, А.И. Ольшанский // Актуальные проблемы науки, техники и экономики производства изделий из кожи: сборник статей международной научной конференции / УО «ВГТУ» ; гл. ред. С.М. Литовский. – Витебск, 2004 – С. 204–207.

11. Макаренко, Е.Ф. Закономерности кинетики сушки влажных материалов / Е.Ф. Макаренко, В.И. Ольшанский // Сборник статей международной научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Молодежь – производству», 21-22 ноября 2006 г. / УО «ВГТУ» ; редкол.: С.М. Литовский [и др.]. – Витебск, 2006. – С. 130–132.

12. Макаренко, Е.Ф. Методика исследования коэффициента теплопроводности подкладочных материалов и текстильных волокон / Е.Ф. Макаренко, В.И. Ольшанский, А.И. Ольшанский // Сборник научных трудов по текстильному материаловедению (посвященный 100-летию со дня рождения Г.Н. Кукина) / МГТУ им. А.Н. Косыгина ; редкол.: Ю.С. Шустов [и др.]. – Москва, 2007. – С. 251–256.

13. Макаренко, Е.Ф. Способы расчета основных характеристик кинетики сушки влажных материалов / Е.Ф. Макаренко, А.И. Ольшанский, В.И. Ольшанский // Сборник докладов межвузовской научно-практической конференции «Инновационные и наукоемкие технологии в легкой промышленности», Москва, 23-25 апреля 2008 г. / ИИЦ МГУДТ. – Москва, 2008. – С. 200–204.

14. Макаренко, Е.Ф. Сушка термоизлучением заготовок верха обуви / Е.Ф. Макаренко, А.И. Ольшанский, В.И. Ольшанский // Техническое регулирование: базовая основа качества товаров и услуг: междунар. сб. науч. тр. / ЮРГУЭС ; редкол.: В.Т. Прохоров [и др.]. – Шахты, 2008. – С. 167–170.

Тезисы докладов:

15. Макаренко, Е.Ф. Производительность сушильной установки с сопловым обдувом для скоростной сушки обуви / Е.Ф. Макаренко // Сборник тезисов докладов XXXVIII научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ» ; гл. ред. С.М. Литовский. – Витебск, 2005. – С. 125.

16. Макаренко, Е.Ф. Экспериментальные исследования распределения температуры по толщине увлажненного пакета материалов / Е.Ф. Макаренко // Сборник тезисов докладов XXXIX научно-технической конференции

преподавателей и студентов / УО «ВГТУ» ; гл. ред. С.М. Литовский. – Витебск, 2006. – С. 125.

17. Макаренко, Е.Ф. Установка для сушки обуви / Е.Ф. Макаренко, В.И. Ольшанский, А.И. Ольшанский // Сборник тезисов докладов участников 5 международного инвестиционного форума «Инвестиции для развития регионов» / КДЦ «Витебск». – 2007. – С. 106.

18. Макаренко, Е.Ф. Разработка и исследование устройств для интенсификации сушки обуви / Е.Ф. Макаренко // Сборник тезисов докладов XL научно-технической конференции преподавателей и студентов университета / УО «ВГТУ» ; гл. ред. В.В. Пятов. – Витебск, 2007. – С. 135–136.

19. Макаренко, Е.Ф. Анализ установок, применяемых для влажно-тепловой обработки / Е.Ф. Макаренко, С.В. Воднев // Тезисы докладов XLI научно-технической конференции преподавателей и студентов университета / УО «ВГТУ» ; редкол.: В.В. Пятов [и др.]. – Витебск, 2008. – С. 136.

20. Макаренко, Е.Ф. Методика расчета кинетики сушки влажных материалов / Е.Ф. Макаренко, А.И. Ольшанский, В.И. Ольшанский // Международная научно-техническая конференция «Современные технологии и оборудование текстильной промышленности» (ТЕКСТИЛЬ-2007) (27-28 ноября 2007 г.) : тезисы докладов / МГТУ им. А.Н. Косыгина ; редкол.: К.И. Кобраков [и др.]. – Москва, 2008. – С. 237–238.

Патенты:

21. Установка для термофиксации и сушки обуви : пат. 3272 РБ : МПК7 А 43 D 95/10 / Е.Ф. Макаренко, С.А. Щеглов, А.А. Угольников, В.И. Ольшанский ; заявитель и патентообладатель УО «ВГТУ». – № u 20060379; заявл. 09.06.06; опубл. 02.10.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 2. – С. 170.

22. Установка проходного типа для термофиксации и сушки обуви : пат. 3357 РБ : МПК7 А 43 D 95/10 / Е.Ф. Макаренко, В.И. Ольшанский, А.А. Угольников, А.И. Ольшанский, Ю.Е. Махаринский ; заявитель УО «ВГТУ». – № u 20060355; заявл. 02.06.06; опубл. 15.11.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 5. – С. 184.

23. Конвективно-радиационная установка проходного типа для термофиксации и сушки обуви : пат. 3986 РБ : МПК(2006) А 43 D 95/00 / Е.Ф. Макаренко, А.А. Угольников, В.И. Ольшанский ; заявитель УО «ВГТУ». – № u 20070221; заявл. 28.03.07; опубл. 01.08.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 2. – С. 164.

РЕЗЮМЕ

МАКАРЕНКО ЕЛЕНА ФРАНЦЕВНА

КОНВЕКТИВНАЯ УСТАНОВКА ПРОХОДНОГО ТИПА ДЛЯ СУШКИ И ТЕРМОФИКСАЦИИ ОБУВИ

Термофиксация, энергосберегающая конвективная сушильная установка проходного типа, кинетика сушки, оптимальные режимы термообработки.

Объектом исследований является конвективная установка проходного типа для сушки и термофиксации обуви. Предметом исследований являются режимные параметры влаготеплообмена при сушке обуви.

Цель работы – разработка энергосберегающей конвективной установки для сушки и термофиксации обуви.

Разработка высокопроизводительной сушильной установки проходного типа базировалась на результатах теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в трудах отечественных ученых и на основе анализа современного импортного высокопроизводительного оборудования. Теоретические исследования базировались на классической теории сушки. Экспериментальные исследования проводились на разработанных экспериментальных установках и сертифицированном стенде. Обработка результатов экспериментальных исследований осуществлялась с применением методов математической статистики.

В результате исследований получены исходные данные на проектирование сушильной установки проходного типа. Разработаны теоретические зависимости для определения полного времени сушки многослойных пакетов материалов, полей влагосодержания и температуры. Получена математическая модель распределения среднеобъемной температуры влажного пакета обувных материалов в процессе сушки. Разработаны методики расчета теплопроизводительности сушильной установки, аэродинамических характеристик установок для сушки обуви при конвективном подводе тепла.

Разработана новая энергосберегающая сушильная установка проходного типа, соответствующая лучшим мировым аналогам. Опытно-промышленный образец конвективной сушильной установки проходного типа внедрен на ЭОП УО «ВГТУ». Установка может быть рекомендована к использованию на обувных предприятиях Республики Беларусь.

РЭЗЬЮМЭ

МАКАРАНКА АЛЕНЬ ФРАНЦАЎНЫ

КАНВЕКЦЫЙНАЯ ЎСТАНОЎКА ПРАХАДНОГА ТЫПУ ДЛЯ СУШКІ І ТЭРМАФІКСАВАННЯ АБУТКУ

Тэрмафіксаванне, энэргазберагаючая канвектыўная ўстаноўка прахаднога тыпу, кінэтыка сушкі, аптымальныя рэжымы тэрмаапрацоўкі.

Аб'ектам даследавання з'яўляецца энэргазберагаючая канвектыўная ўстаноўка прахаднога тыпу для сушкі і тэрмафіксавання абутку. Прадметам даследавання з'яўляюцца рэжымныя параметры вільгацэплаабмену ў выніку сушкі абутку.

Мэта працы – распрацоўка энэргазберагаючай канвектыўнай устаноўкі для сушкі і тэрмафіксавання абутку.

Распрацоўка высокапрадукцыйнай сушыльнай устаноўкі прахаднога тыпу грунтавалася на выніках тэарэтычных і эксперыментальных даследаванняў, выкладзеных у працах айчынных і замежных навукоўцаў і на падставе аналізу сучаснага імпартнага высокапрадукцыйнага абсталявання. Тэарэтычныя даследаванні грунтаваліся на класічнай тэорыі сушкі. Эксперыментальныя даследаванні праводзіліся на распрацаваных эксперыментальных устаноўках і сертыфікаваным стэндзе. Апрацоўка вынікаў эксперыментальных даследаванняў ажыццяўлялася з выкарыстаннем метадаў матэматычнай статыстыкі.

У выніку даследаванняў былі атрыманы зыходныя даныя для праектавання сушыльнай устаноўкі прахаднога тыпу.

Распрацаваны тэарэтычныя залежнасці для вызначэння поўнага часу сушкі шматслойных пакетаў матэрыялаў, палёў вільгацеўтрымання і тэмпературы. Атрымана матэматычная мадэль размеркавання сярэднеаб'ёмнай тэмпературы вільготнага пакета абутковых матэрыялаў у працэсе сушкі. Распрацаваны метадыкі разліку цеплапрадукцыйнасці сушыльнай устаноўкі, аэрадынамічных характэрыстык устаноўак для сушкі абутку пры канвектыўным падводзе цяпла.

Распрацавана новая энэргазберагаючая сушыльная ўстаноўка прахаднога тыпу, якая адпавядае лепшым сусветным аналагам. Вопытна-прамысловая канвектыўная сушыльная ўстаноўка прахаднога тыпу укаранена на ЭВП УА “ВДТУ”. Устаноўка можа быць ракамендава да выкарыстання на абутковых прадпрыемствах Рэспублікі Беларусь.

THE RESUME

MAKARENKO ELENA FRANCEVNA

CONVECTIONS INSTALLATION OF TYPE THROUGH PASSAGE FOR DRYING AND THERMOFIXING FOOTWEAR

Thermo fixing, energy savings convections drying installation of type through passage, kinetics drying, optimum modes of heat treatment.

Object of researches is convections installation of passage type for footwear drying and thermofixing. A subject of researches is regime parameters of moisture heat exchange at footwear drying.

The work purpose – development of energy savings convections installations for footwear drying and thermofixing.

Working out of high-efficiency drying installations of passage type was based on results of theoretical and experimental researches stated in works of domestic scientists and on the basis of the analysis of the modern import high-efficiency equipment. Theoretical researches were based on the classical drying theory. Experimental researches carried out on the developed experimental installations and the certificated stand. Processing of results of experimental researches was carried out with application mathematical statistics methods.

As a result of researches initial data for designing of drying installations of through passage type are obtained. Theoretical dependences are developed for definition of full time drying of multilayered materials packages, fields moisture contain and temperatures. The mathematical model of medium-volume temperatures distribution of a damp package of shoe materials in the course of drying is received. The calculation method of drying installations productivity and aerodynamics characteristics of installations for footwear drying by convectional heat supply are developed.

The new energy savings drying installation of passage corresponding the best world analogues is developed. The experimental model of convectional drying installation of passage type introduced at EE VSTU. Installation is recommended to use at the shoe enterprises on the Republic of Belarus.

МАКАРЕНКО ЕЛЕНА ФРАНЦЕВНА

**«КОНВЕКТИВНАЯ УСТАНОВКА ПРОХОДНОГО ТИПА
ДЛЯ СУШКИ И ТЕРМОФИКСАЦИИ ОБУВИ»**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Витебский государственный технологический университет

Подписано в печать 16.04.09 Формат 60×90 1/16. Печать ризографическая.
Уч.-изд. л. 1.7. Усл. печ. л. 1.75. Тираж 80 экз. Заказ 197. Цена 620

Отпечатано на ризографе ЦИТ УО “ВГТУ”.
Лицензия № 02330/0494384 от 16.03.2009 г.
210035, г. Витебск, Московский пр-т, 72