

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

Институт технической теплофизики

На правах рукописи

ШЕЛИМАНОВ Виталь Александрович

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИМ ТЕПЛОМАССО-  
ПЕРЕНОСОМ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ ПРИ  
СОЗДАНИИ ЭНЕРГОРЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИИ

Специальность 01.04.14 - Теплофизика и молекулярная  
физика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук



Киев - 1994

AB 37.460

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Институте технической теплофизики  
Национальной Академии наук Украины

Официальные оппоненты:

доктор технический наук,

профессор

Луцки П.П.

доктор химических наук,

профессор

Манк В.В.

доктор технических наук,

профессор

Кашурин А.Н.

Ведущая организация - Украинский Государственный  
университет пищевых технологий, г.Киев.

Защита состоится "27" dec 1994 г. в 14 часов на  
заседании специализированного ученого совета Д 016.43.01 в  
Институте технической теплофизики НАН Украины (252057,  
Киев-57, ул.Желязова, 2а).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТФ НАН  
Украины.

Автореферат разослан "25" 11 1994 г.

Ученый секретарь  
специализированного ученого совета,

кандидат технических наук

Костенко Н.В.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00755866 (.)

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Вопросы энерго- и ресурсосбережения приобрели особую остроту в Украине в связи с истощением собственных запасов органического топлива и зависимостью от поставок энергоносителей, а также сырья для ряда отраслей промышленности из стран ближнего и дальнего зарубежья. Основой при создании энергоресурсосберегающих экологически чистых технологий различных отраслей промышленности являются процессы переноса теплоты и массы с участием твердых дисперсных материалов.

Многочисленные исследования процессов тепло- и массоотдачи показали высокую эффективность их интенсификации за счет повышения скорости теплоносителя, его искусственной турбулизации, применения элементов малых геометрических размеров, вибрации поверхностей, наложения акустических, неоднородных электрических и магнитных полей, а также частичная или полная замена конвективного теплообмена высокотемпературным радиационным, контактным, индукционным, высокочастотным методами подвода теплоты в тех случаях, когда применение этих методов будет оправдано экономически с учетом все возрастающей стоимости энергоносителей.

Однако в технологических процессах различных отраслей промышленности широко распространен перенос теплоты и массы в твердых дисперсных материалах - увлажнение, сушка, пропитка, экстракция, мембранное разделение жидких и газообразных веществ и т.п. При этом интенсивность теплопереноса в дисперсных материалах целиком определяется скоростью внутреннего массопереноса. Очень часто в этих случаях интенсификация внешнего теплообмена не позволяет получить положительные результаты, так как интенсивность протекания технологических процессов с участием дисперсных материалов чаще всего лимитируется именно скоростью внутреннего переноса массы, которая определяет как производительность технологического оборудования, так и качество получаемой продукции. В частности, во многих случаях производительность всей технологической линии сдерживается недостаточной интенсивностью наиболее энергоемких процессов сушки материалов. Причем, интенсифицировать процесс сушки не всегда удается без ускорения внутреннего массопереноса. В Институте технической теплофизики (ИТТФ) НАН Украины были разработаны высокоинтенсивные методы сушки ряда материалов: сушка высокотемпературным влажным теплоносителем, а также пародепрессионный метод сушки, суть которого заключается в том, что сушимый материал помещается в паропроницаемую пористую оболочку. Вслед-

ствие снижения интенсивности испарения, температура материала повышается, что и ведет к ускорению внутреннего влагопереноса. При определенных сочетаниях режимных параметров удается не только компенсировать замедление внешнего теплообмена поверхности материала с окружающей средой, но и обеспечить общее ускорение процесса сушки.

Опубликованные в литературе результаты исследований свидетельствуют о недостаточной изученности влияния температуры материала, его структурных характеристик, формы капилляров и добавок поверхностно-активных веществ (ПАВ) на внутренний массоперенос, а также механизма пародепрессионной сушки. Все это и определяет актуальность исследований внутреннего тепло-массопереноса в дисперсных материалах.

Целью работы является установление механизма переноса массы в моделях пористых сред, а также разработка практических способов управления внутренним тепло-массопереносом при создании новых энергоресурсосберегающих технологий и совершенствовании существующих технологических процессов гидро- и гидротермической обработки дисперсных материалов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- изучение капиллярного движения жидкости в одиночных капиллярах, двухкапиллярной модели пористого тела - системе двух разновеликих капилляров, соединенных друг с другом по всей длине, и капиллярно - пористых материалах;
- экспериментальное исследование влияния неионогенных ПАВ на процесс капиллярного впитывания жидкости материалами;
- исследование процесса испарения жидкости из капилляров переменного сечения, а также цилиндрических капилляров при наличии воздухо- и полупроницаемых оболочек;
- изучение влияния свойств воздухопроницаемых оболочек на температуру материала и интенсивность внутреннего массопереноса при пародепрессионной сушке материалов.

Работа выполнялась в соответствии с планами научно-исследовательских работ Института технической теплофизики НАН Украины, входящих в координационные планы НАН Украины по проблемам "Теплофизика" и "Теплофизика и теплоэнергетика", в целевую комплексную научно-техническую программу О.Ц.030 "Развитие производства биологически полноценных пищевых продуктов на основе комплексного использования сырья и снижения его потерь" на 1981-1985 гг., а также в работы по Постановлениям Совета Министров УССР и других

директивных документов.

Метод исследования. Исследования проведены на моделях пористых сред - одиночных цилиндрических капиллярах и капиллярах переменного сечения, двухкапиллярной модели пористого тела, а также модельных капиллярно-пористых телах различной структуры.

Аналитические и численные исследования процессов переноса массы в моделях пористых сред сопоставлялись с экспериментальными данными, опубликованными в литературе и полученными в работе с использованием традиционных методов исследований.

Достоверность полученных результатов определяется соответствием предложенных математических моделей процессов массопереноса экспериментальным результатам, использованием апробированных методов исследований, удовлетворительным согласованием результатов работы с опубликованными данными.

Научная новизна работы.

- Получены аналитические зависимости, учитывающие влияние толщины и вязкости граничного слоя на скорость ламинарного течения в капиллярах. Впервые проанализирована температурная зависимость скорости движения воды в цилиндрических капиллярах различного радиуса при скачкообразном и гиперболическом характерах изменения вязкости в граничном слое.

- Впервые получено дифференциальное уравнение движения жидкости под действием капиллярных сил в конических капиллярах. Установлено влияние конусности и сил трения вытесняемого воздуха на скорость капиллярного движения.

- Впервые получены дифференциальные уравнения капиллярного впитывания жидкости двухкапиллярной моделью пористого тела с учетом сопротивления течению жидкости из широкого капилляра в узкий. Установлен механизм переноса жидкости в рассматриваемой системе, который качественно подтверждается при капиллярном впитывании жидкости капиллярно-пористыми материалами.

- Вскрыто влияние добавок неионогенных ПАВ на процессы капиллярного впитывания воды одиночными вертикально расположенными цилиндрическими капиллярами и твердыми дисперсными материалами. Определены значения концентраций растворов ПАВ, при которых наблюдается интенсификация влагопереноса в тонкопористых материалах.

- Показано существенное влияние формы одиночных капилляров на скорость углубления мениска при испарении жидкости.

- Получены аналитические зависимости, описывающие процесс

переноса массы через воздухопроницаемые оболочки при испарении из одиночных капилляров и материалов с учетом сопротивления фильтрационному переносу парогазовой смеси.

- Предложены методика экспериментального определения коэффициентов диффузионного сопротивления, фильтрации и проницаемости материала в процессе испарения воды из цилиндрических капилляров (трубок) через воздухопроницаемые оболочки и изучено влияние температуры и влагосодержания теплоносителя, а также состояния оболочки на скорость массопереноса через нее.

- Впервые получены аналитические зависимости, описывающие процесс испарения из одиночных цилиндрических капилляров через полупроницаемые оболочки, вскрыт механизм этого процесса.

#### Практическая ценность работы.

- Предложен способ ускорения капиллярного переноса жидкости в тонкопористом материале за счет соединения с грубопористым.

- Обоснован выбор оптимальных концентраций неионогенных ПАВ, при которых наблюдается наибольшее ускорение влагопереноса в процессе капиллярной пропитки тонкопористых материалов.

- Разработана методика комплексного экспериментального определения величин коэффициентов диффузионного сопротивления, фильтрации и проницаемости воздухопроницаемых оболочек по кинетике испарения жидкости из сообщающихся капилляров (трубок) и нестационарной фильтрации паровоздушной смеси.

- Разработана методика и программа расчета на ПЭМ температуры материала и величины избыточного давления под воздухопроницаемой оболочкой в первом периоде пародепрессионной сушки.

- Разработана методика экспериментального определения величины коэффициента паропроницаемости полупроницаемых оболочек по кинетике испарения жидкости из сообщающихся капилляров (трубок).

- Предложен метод анализа пористой системы материала по величине давления под оболочкой в процессе испарения жидкости.

- Предложены способы управления процессами внутреннего массопереноса путем: изменения температуры материала за счет использования паропроницаемых оболочек и высоковлажного высокотемпературного теплоносителя; применения неионогенных ПАВ, а также перехода к обработке материала в виде минимально-возможных элементов.

Реализация результатов. Результаты исследований использованы в ИТФ НАН Украины при создании высокоинтенсивных способов сушки коконов, вязкого шелка в куличах, дозирующего стекловолокон-

нита, а также технологических линий промышленной переработки льна, производства пищевого красителя на основе отоловой свеклы и переработки яблочных выжимок. Разработки защищены авторскими свидетельствами и внедрены в Украине и ряде стран СНГ. Технологическая линия по производству порошков из яблочных выжимок внедрена в Чехословакии.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на IV Международном конгрессе по химическому машиностроению и автоматизации (СН15А-72) (Прага, 1972), Международных форумах по тепло- и массообмену (Минск, 1988; Киев, 1992); Всесоюзных совещаниях по тепло- и массообмену (Минск, 1968, 1972); Всесоюзных и республиканских конференциях и семинарах по сушке (Москва, 1965, Калинин, 1977; Симферополь, 1978 г., Чернигов, 1981 г., Полтава 1984 г., Черкассы 1987 г., Киев, 1990 г.); Всесоюзных и республиканских научно-технических конференциях и совещаниях (Москва, 1986, 1987 гг., Киев, 1989, 1991 гг.).

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 63 печатных работы, получено 12 авторских свидетельств.

Личное участие автора состоит в постановке и разработке основной идеи диссертации, в постановке и решении основных задач работы теоретического, экспериментального и прикладного характера. При непосредственном участии автора разработаны методики и лабораторные установки, выполнены экспериментальные исследования. Автору принадлежат основные положения большинства опубликованных в соавторстве и использованных в диссертации работ, а также проведенные в диссертации анализ и обобщение их результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 451 источник. Диссертация изложена на 308 страницах машинописного текста, содержит 185 рис. и 5 таблиц.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основная цель и задачи исследований, кратко изложена научная новизна и практическая значимость полученных в работе результатов.

В первой главе представлен обзор научных исследований в области переноса теплоты и массы в твердых дисперсных материалах, рассмотрена получившая наибольшее распространение схема форм связи влаги с материалом, предложенная академиком П.А.Рабиндером. Проанализированы экспериментальные данные

Б.В.Дерягина, Н.В.Чураева, Н.И.Гаманюкова, Н.Н.Федякина и др. об отличии свойств граничных слоев жидкости от свойств жидкости в объеме. В частности, показано, что вязкость граничных слоев полярных жидкостей существенно выше вязкости в объеме, приведены модели скачкообразного, гиперболического и экспоненциального характера изменения вязкости по мере удаления от твердой стенки.

Механизм переноса жидкости и его интенсивность определяются коллоидно-физическими свойствами твердых дисперсных материалов, что положено в основу классификации этих материалов, предложенной А.В.Лыковым, которая развита в работах А.В.Кисилева, С.П.Рудобашты, А.Ф.Буляндры, Б.С.Сажина, Р.В.Луцка, исходя из структурных и технологических особенностей реальных материалов.

Рассмотрена также классификация моделей пористой системы А.П.Карнаухова, которая дополнена из работ других авторов с учетом разнообразия форм и размеров пор в материалах.

Изложены существующие представления о видах массопереноса в моделях пористых сред и реальных материалах. Проанализирована зависимость интенсивности тепло- и массопереноса в твердых дисперсных материалах в зависимости от вида тела, его структуры, влагосодержания, температуры, наличия растворенных в воде электролитов и поверхностно-активных веществ.

Результаты экспериментальных исследований интенсивности массопереноса во влажных материалах при различных температурах, проведенных Я.М.Миниовичем, В.И.Дубницким, А.С.Гинзбургом, Н.Е.Горобцовой и др., а также результаты наших исследований подтверждают резкую зависимость ее от абсолютной температуры (пропорциональна  $T^n$ ). Однако, механизм воздействия температуры на процесс массопереноса не вскрывается. Показана также недостаточная изученность влияния формы капилляров, структурных характеристик материала и добавок неионогенных ПАВ на механизм внутреннего влагопереноса, а также свойств паропроницаемых оболочек на процесс пародепрессионной сушки высокотемпературным высоковлажным теплоносителем, разработанный в ИТФ НАН Украины.

Анализ состояния исследований процессов массопереноса во влажных материалах и путей управления ими показал необходимость проведения исследований массопереноса на моделях пористых сред в виде одиночных капилляров, двухкапиллярной модели пористого тела и модельных материалах различной структуры, а также позволил обосновать цель диссертационной работы и задачи исследований.

Во второй главе приведены результаты исследований капиллярного движения жидкости в моделях пористых сред: одиночных капиллярах и двухкапиллярной модели пористого тела.

В слое граничном с твердой поверхностью свойства жидкостей отличаются от свойств жидкости в объеме. В случае жидкостей с дипольными молекулами по представлениям Б.В.Дерягина, Н.Н. Федякина и др. авторов наблюдается резкий переход от свойств жидкости в граничном слое к свойствам жидкости в объеме на некотором расстоянии от твердой стенки. Рассмотрение дифференциального уравнения, определяющего скорость течения жидкости как функцию расстояния от оси трубы, при условии, что вязкость жидкости  $\eta_a$  в граничном слое толщиной  $\delta$  постоянна и отлична от вязкости жидкости  $\eta$  в объеме, и что на расстоянии  $\delta$  от стенки происходит скачкообразное изменение вязкости от  $\eta_a$  до  $\eta$ , приводит к следующей зависимости для объемного расхода жидкости через капилляр:

$$V = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\Delta P}{l} \left\{ (1 - \bar{\delta})^4 + \frac{\eta}{\eta_a} \bar{\delta} [1 + (1 - \bar{\delta})^2] [1 + (1 - \bar{\delta})^2] \right\}, \quad (2.1)$$

где:  $\bar{\delta} = \delta/r$  - относительная толщина граничного слоя жидкости;  $\Delta P$  - разность давлений на участке капилляра длиной  $l$ .

В этой зависимости комплекс перед фигурной скобкой представляет собой уравнение Пуазейля-Гагена, а в фигурных скобках - поправку  $P_{\delta}$ , учитывающую влияние свойств в граничном слое на процесс движения влаги. Причем, при отсутствии граничного слоя или в случае, когда достаточно велик радиус капилляра, т.е. отношение  $\bar{\delta}$  мало, значение поправки  $P_{\delta}$  незначительно отличается от 1, и формула (2.1) превращается в уравнение Пуазейля для жидкости, вязкость которой равна объемной. При  $\bar{\delta} = 1$ , т.е. когда граничный слой заполняет все пространство капилляра, получаем уравнение Пуазейля для жидкости с вязкостью  $\eta_a$ .

Анализ влияния изменения толщины граничного слоя и его вязкости на профиль скоростей и интенсивность движения влаги по капилляру показывает, что для ускорения движения необходимо уменьшать толщину и вязкость граничного слоя, а также вязкость объемной жидкости. При малых относительных толщинах граничного слоя ( $\bar{\delta} < 0,25$ ) на скорость движения жидкости более заметно сказывается уменьшение толщины слоя, чем его вязкости, а при высоких - сильнее влияние вязкости.

Ю.А.Михайлов и др. исследователи предполагают гиперболический характер изменения вязкости жидкости в граничном слое:

$$\frac{\eta_a}{\eta} = 1 + \frac{\delta^3}{y^3}, \quad (2.2)$$

где:  $\delta$  - расстояние от твердой стенки, при котором вязкость жидкости в 2 раза выше вязкости в объеме, и характеризует степень влияния стенки на величину вязкости жидкости.

Поправка к уравнению Пуазейля в этом случае получена в виде:

$$\Pi_\delta = 1 - 4\delta \left\{ \frac{1}{6} (1 + \delta)^2 \ln \left| \frac{(1 + \delta)^2}{\delta^2 - \delta + 1} \right| + \frac{3}{2} \delta^2 - \right. \\ \left. - \frac{\sqrt{3}}{3} (3\delta - \delta^2 - 1) \left[ \operatorname{arctg} \frac{(2 - \delta)^2}{\sqrt{3}} - \operatorname{arctg} \frac{-1}{\sqrt{3}} \right] - \delta^2 \right\}. \quad (2.3)$$

В работе проанализировано также рассмотренное Н.В.Чураевым течение жидкости в цилиндрическом капилляре при экспоненциальном изменении вязкости в граничном слое. Анализ полученных результатов показал, что все рассмотренные модели изменения вязкости в граничном слое дают качественно одинаковую картину влияния толщины слоя на величину эффективной вязкости, т.е. чем больше толщина слоя, тем больше эффективная вязкость жидкости в капилляре.

Из экспериментальных данных по тепловому расширению воды в капиллярах (Н.Н.Федякин), течению в кварцевых капиллярах (Н.В.Чураев) и силикагеле (З.М.Товбина) получены зависимости толщины граничного слоя воды от температуры для различных моделей, которые использованы при анализе влияния температуры на интенсивность движения воды в одиночных цилиндрических капиллярах. Используя также табличные значения плотности, поверхностного натяжения и динамической вязкости воды, рассчитывался ее поток при различных температурах. Затем строились зависимости относительной интенсивности влагопереноса от абсолютной температуры ( $g/g_0$ ) =  $\sigma T^n$  для капилляров различного радиуса, и методом наименьших квадратов определялись значения постоянной  $\sigma$  и показателя степени  $n$ . Значения показателя степени при  $\eta_a/\eta = 10$  (рис. 1) удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными для различных материалов и силикагелей различного фракционного состава, и определяются, в основном, изменением толщины граничного слоя жидкости с ростом температуры.

Влияние формы капилляров на процесс движения воды изучалось на одиночных цилиндрических и конических капиллярах.

Теоретическому рассмотрению ламинарного течения вязкой жидкости в конфузорах и диффузорах при малых числах Рейнольдса посвящены работы Н.А.Слезкина, С.М.Тарга, В.И.Керчмана и др. Полученные при этом расчетные зависимости достаточно сложны для практического использования. Поэтому, при выводе дифференциального уравнения движения жидкости в капиллярах переменного сечения принималось, что в каждом поперечном сечении профиль скорости параболический согласно уравнению Пуазейля, а из сопоставления с известными аналитическими решениями были определены соответствующие поправки. В результате получено дифференциальное уравнение движения жидкости в капиллярах переменного сечения, которое для конических горизонтальных капилляров с учетом силы трения вытесняемого воздуха имеет вид:

$$8\eta r^2 \frac{d\ell}{dt} \left[ \int_0^{\ell} \frac{dx}{r^4} + \frac{\eta_B}{\eta} \int_{\ell}^L \frac{dx}{r^4} \right] - \frac{2\sigma \cos\theta}{r} \frac{P_\sigma}{P_K} = 0, \quad (2.4)$$

где:  $\frac{d\ell}{dt}$  - скорость перемещения мениска;  $\ell$  - место расположения мениска;  $L$  - длина капилляра;  $P_\sigma = \sqrt{1 + k^2} - K/\cos\theta$  и  $P_K = 1 + 0,0416k + 0,24k^2$  - поправки, учитывающие влияние конусности на величину капиллярного давления в месте контакта жидкости со стенкой капилляра и отличие градиентов давления в коническом и цилиндрическом капиллярах.

В экспериментальных исследованиях радиусы капилляров изменялись от 30 до 250 мкм. Конусность капилляров составляла 0,1-0,65 мм/мм при их длине 180-210 мм. Экспериментальные данные сравнивались с расчетными величинами, полученными при решении дифференциального уравнения (2.4).

Повышение температуры воды приводит к увеличению скорости ее движения в капиллярах различной формы, которое вызвано изменением вязкости и поверхностного натяжения воды. Влияние же сил трения воздуха определяется температурой и геометрией капилляра. Для расширяющихся и цилиндрических капилляров это влияние незначительно. Для суживающихся капилляров время движения воды с учетом сил трения воздуха по полученным нами данным при  $t = 20^\circ\text{C}$  на 10-16%, а при  $t = 90^\circ\text{C}$  - на 40-60% больше, чем при их отсутствии. Это вызвано увеличением вязкости воздуха с повышением его температуры. Влияние силы трения воздуха возрастает с увеличением конусности.

Скорость движения воды для расширяющихся капилляров в 5-10

раз больше, чем для этих же капилляров, но с противоположным направлением движения (суживающиеся капилляры). Причем, разница тем больше, чем больше конусность капилляра, а при одинаковой конусности — чем больше радиус суживающегося конца капилляра. Сопоставление полученных экспериментальных данных с расчетными кривыми подтвердило правильность исходных предпосылок, которые использовались при выводе дифференциального уравнения движения влаги по горизонтальному коническому капилляру.

Движение жидкости в двухкапиллярной модели изучалось экспериментально с помощью кино съемки на образце из оргстекла, который содержал два капилляра различного размера, соединенных непосредственно между собой по всей длине, и два изолированных капилляра таких же размеров. В качестве пропитывающей жидкости было взято вакуумное масло, которое хорошо смачивает оргстекло.

Анализ кинограмм показал (рис.2), что в самом начале процесса мениск в узком капилляре отстает от мениска в широком. Затем — вплоть до окончания пропитки, опережает мениск в широком капилляре. При этом, до тех пор пока можно обнаружить перемещение мениска в узком капилляре, наблюдается, хотя и более медленное, перемещение в широком. Уровень же жидкости в широком изолированном капилляре в это время практически неподвижен. Кроме того, уровень жидкости в узком изолированном капилляре все время отстает от уровня в узком сообщающемся, а в широком — опережает уровень в широком сообщающемся капиллярах, что свидетельствует о перетоке жидкости из широкого капилляра в узкий, чем и объясняется более высокая скорость перемещения мениска в узком сообщающемся капилляре.

При анализе полученных экспериментальных данных сопротивление перетоку жидкости представлялось как сопротивление трения целевого соединительного канала шириной  $\Delta$  и длиной  $l_{12}$ , характеристики которого определялись из геометрических размеров модели и экспериментальных данных в момент равенства уровней в широком и узком капиллярах. Скорость течения жидкости в соединительном канале  $W_{12}$  находилась из решения следующего дифференциального уравнения, полученного из баланса массы переносимой жидкости:

$$\frac{d^2 W_{12}}{dx^2} = \Lambda W_{12}, \quad (2.5)$$

где:

$$\Lambda = \frac{\Delta}{\omega} \frac{R_1 f_1 + R_2 f_2}{R_1 f_1 \cdot R_2 f_2}; \quad \omega = \frac{l_{12}}{R_{12}}; \quad R_1 = \frac{\rho g r_1^2}{8\eta}; \quad R_2 = \frac{\rho g r_2^2}{8\eta}; \quad R_{12} = \frac{\rho g \Delta^2}{12\eta};$$

$f_1$  и  $f_2$  - сечения узких и широких капилляров (радиусом  $r_1$  и  $r_2$ ).

На первой стадии процесса переток жидкости из широкого капилляра в узкий происходит на длине  $\ell_1$ , соответствующей уровню жидкости в узком капилляре. Из этого уравнения определяем распределение скорости перетока жидкости и перепада<sup>c</sup> давления на этой длине в обоих капиллярах, течение жидкости в которых предполагается подчиняющимся уравнению Пуазейля. В результате получена следующая система дифференциальных уравнений впитывания жидкости в двухкапиллярной модели:

$$f_1 \frac{d\ell_1}{dt} + (1-B_1) f_2 \frac{d\ell_2}{dt} = [R_1 f_1 + (1-B_1) R_2 f_2] \frac{H_1 - \ell_1 \sin\varphi}{\ell_1}, \quad (2.6)$$

$$f_2 \frac{d\ell_2}{dt} = R_2 f_2 \frac{(H_2 - \ell_2 \sin\varphi) - (1-B_1)(H_1 - \ell_1 \sin\varphi)}{\ell_2 - (1-B_1)\ell_1}, \quad (2.7)$$

где:  $\ell_1$  и  $\ell_2$  - положение менисков в узком и широком капиллярах в момент времени  $t$ ;  $\varphi$  - угол наклона модели к горизонту.

На второй стадии процесса, когда  $\ell_1 > \ell_2$ , переток жидкости происходит на участке  $\ell_2$  и система уравнений принимает вид:

$$f_1 (1-B_1) \frac{d\ell_1}{dt} + f_2 \frac{d\ell_2}{dt} = [R_2 f_2 + (1-B_2) R_1 f_1] \frac{H_2 - \ell_2 \sin\varphi}{\ell_2}, \quad (2.8)$$

$$f_1 \frac{d\ell_1}{dt} = R_1 f_1 \frac{(H_1 - \ell_1 \sin\varphi) - (1-B_2)(H_2 - \ell_2 \sin\varphi)}{\ell_1 - (1-B_2)\ell_2}. \quad (2.9)$$

В формулах (2.6)-(2.9)  $B_1$  и  $B_2$  -- комплексы, характеризующие степень связанности капилляров:

$$B_1 = \left[ 1 + \frac{1}{R_{21}} (Z_1 \sqrt{A H_1^2} \operatorname{oth} Z_1 \sqrt{A H_1^2} - 1) \right]^{-1}, \quad (2.10)$$

$$B_2 = \left[ 1 + \frac{1}{R_{22}} (Z_2 \sqrt{A H_2^2} \operatorname{oth} Z_2 \sqrt{A H_2^2} - 1) \right]^{-1}, \quad (2.11)$$

где:  $R_{21} = \frac{R_1 f_1 + R_2 f_2}{R_1 f_1}$ ;  $R_{22} = \frac{R_1 f_1 + R_2 f_2}{R_2 f_2}$ ;  $H_1 = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g r_1}$ ;  $H_2 = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g r_2}$ ;

$Z_1 = \ell_1/H_1$  и  $Z_2 = \ell_2/H_2$  - относительные величины уровней в капиллярах.

При  $B_1 \rightarrow 1$  или  $B_2 \rightarrow 1$  получаем уравнения, описывающие течение жидкости в изолированных капиллярах, а при  $B_1 \rightarrow 0$  - в идеальной модели, когда сопротивление перетоку жидкости пренебрежимо мало.

Эти системы уравнений решались численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка с использованием ЭВМ. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных представлены на рис.3 в виде

зависимостей  $dZ_2/dZ_1$ , от  $Z_2$ . При  $Z_2 > 0,3$ , т.е. после прохождения точки равенства уровней в обоих капиллярах, экспериментальные точки и расчетная кривая для идеальной модели практически совпадают. На начальном участке учет сопротивления перетоку жидкости приводит к качественно одинаковому характеру изменения рассматриваемых величин, однако наблюдается значительное количественное расхождение. Это связано с тем, что в начале при малых  $l/r$  течение в капиллярах не описывается уравнением Пуазейля. Использование полного среднего (кажущегося) коэффициента трения по зависимости Лангхаара, учитывающего эффекты увеличения скорости во входном сечении и развития поля скоростей, привело к удовлетворительному совпадению расчетных и экспериментальных данных.

Система уравнений для идеальной модели позволяет получить аналитическое решение при горизонтальном расположении капилляров.

В этом случае между безразмерными длинами столбиков жидкости должна наблюдаться прямопропорциональная зависимость, что было подтверждено на второй стадии пропитки горизонтально расположенной модели. Таким образом, установлено влияние скорости жидкости на характер ее движения в двухкапиллярной модели, обусловленное гидравлическим сопротивлением перетоку жидкости.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям капиллярного движения жидкости в капиллярно-пористых и капиллярно-пористых коллоидных материалах.

Анализ результатов исследований процесса движения жидкости в двухкапиллярной модели показал, что отношение уровней жидкости в узких и широких капиллярах больше 1 и имеется максимум при  $r_2/r_1 = 1,75-2,25$ , который тем больше, чем больше количество тонких капилляров, приходящихся на один широкий. Отсюда следует, что соединением тонкопористых тел с грубопористыми можно ускорить влагоперенос в тонкопористом материале за счет меньшего сопротивления течению жидкости в грубопористом материале. Экспериментальные исследования на кварцевом песке, представленные на рис. 4, полностью согласуются с данными расчетного анализа. Скорость капиллярной пропитки кварцевого песка с размером частиц до 0,25 мм ниже, чем такого же песка с размером частиц 0,5 мм (кривые 1 и 2). При пропитке образца, в котором эти фракции соприкасаются между собой, скорость пропитки тонкодисперсного песка возрастает (кривая 3), а грубодисперсного - падает (кривая 4).

От структурных характеристик пористой системы зависит и механизм воздействия добавок неионогенных ПАВ - спиртов с различ-

ной молекулярной массой (бутиловый, амилловый, гептиловый и др.).

Интенсивность переноса жидкости при ее капиллярном впитывании материалами по предложению Б.В.Дерягина характеризуется темпом пропитки, который является коэффициентом пропорциональности между величиной квадрата объема впитанной жидкости и временем процесса:

$$V^2 = m\tau, \quad (3.1)$$

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке Б.В.Дерягина, в которой пропитка образца производилась при постоянном давлении, а количество впитанной жидкости определялось объемным методом по изменению уровня жидкости в мерном цилиндре, устроенном по принципу сосуда Мариотта.

Изучение кинетики впитывания растворов бутилового спирта различной концентрации для образцов из искусственного волокна и силикагеля показали, что добавки ПАВ интенсифицируют процесс капиллярной пропитки. Относительная величина темпа пропитки  $m/m_0$  (где  $m_0$  - темп пропитки материала дистиллированной водой) с увеличением концентрации изменяется не монотонно (рис.4). Имеются две области концентраций ( $\sigma \approx 0,5\%$  и  $2,5\%$  для бутилового спирта), при которых наблюдается наибольшая интенсификация массопереноса. Сопоставление с величиной адсорбции молекул ПАВ из растворов различной концентрации показывает, что область концентрации  $0,5\%$  соответствует окончанию линейного участка изотермы адсорбции, т.е. образованию монослоя, молекулы ПАВ в котором расположены параллельно твердой поверхности. При  $\sigma = 2,5-3,0\%$  заканчивается формирование монослоя с ориентацией молекул перпендикулярно поверхности раздела твердое тело - жидкость. Причем, с увеличением длины цепочки, т.е. с увеличением молекулярной массы спирта, значения концентраций, при которых наблюдается наибольшее ускорение пропитки, уменьшаются.

Эффект интенсификации снижается при пропитке материалов с более крупными порами, т.е. в материалах, где влияние повышенной вязкости граничных слоев меньше. Применение добавок неионогенных ПАВ позволяет получать дополнительное ускорение процесса массопереноса и при переходе к повышенным температурам, однако степень интенсификации с ростом температуры уменьшается.

Экспериментальные исследования влагопереноса в одиночных капиллярах и материалах с различными структурными характеристиками показали, что благодаря адсорбции ПАВ на стенках капилляров наблюдается снижение концентрации ПАВ у мениска движущейся жидко-

сти и возникает диффузионный поток молекул ПАВ вдоль капиллярной системы. Поверхностное натяжение на мениске возрастает по сравнению с поверхностным натяжением исходного раствора, что благоприятно сказывается на скорости массопереноса. Воздействие же на граничные слои жидкости приводит к более резкому снижению эффективной вязкости жидкости, и этот эффект превалирует над снижением поверхностного натяжения по сравнению с чистой водой.

Исследованиями показано, что наличие неионогенных ПАВ в растворах может приводить к интенсификации влагопереноса в тонкопористых телах и замедлению - в грубопористых, что позволяет добавками ПАВ управлять влагопереносом в виде жидкости и наличие их в растворах необходимо принимать во внимание при отработке режимов гидротермической обработки материалов в реальных технологических процессах.

В четвертой главе изложены результаты исследований процесса испарения жидкости из одиночных капилляров сложной формы и цилиндрических капилляров при наличии добавок летучих ПАВ, а также из капиллярных трубок через воздухопроницаемые оболочки.

Используя формулу Стефана, получены зависимости для расхода пара  $G_n$  и скорости углубления мениска в капиллярах с произвольным законом изменения сечения:

$$\frac{d\ell}{dt} = \frac{G_n}{\rho I(\ell)} = \frac{D_p P}{\ell \int_0^{\ell} \frac{dx}{I(x)}} \ln \frac{P - p_n''}{P - p_{n0}}, \quad (4.1)$$

где:  $p_{n0}$  - парциальное давление паров в окружающей среде.

Эксперименты проводились на неполярной жидкости - бензоле при температуре 20°C параллельно на капиллярах цилиндрической и сложной форм. Через определенные промежутки времени фиксировали положение менисков с помощью катетометра КМ-6. После опытов капилляры разрезали в нескольких местах и определяли зависимость радиусов от их длины. Сопоставление экспериментальных данных с расчетными, представленное на рис.5, свидетельствует о корректности полученных формул. Кроме того, из рис.5 следует, что скорость испарения для расширяющегося к устью капилляра выше, а для суживающегося - ниже по сравнению с цилиндрическим капилляром при одних и тех же условиях.

Результаты экспериментов в виде зависимости обратной величины скорости углубления мениска от его положения для капилляра, в котором имелось несколько чередующихся участков расширения и су-

жения, приведены на рис.6. Максимальные отклонения по сравнению с цилиндрическим капилляром наблюдаются при прохождении мениском мест сужения и расширения, что согласуется с аналитическими результатами при рассмотрении процесса углубления мениска в капилляре, радиус которого изменяется по синусоидальному закону.

Полученные результаты объясняются перераспределением парциального давления паров испаряющейся жидкости по длине капилляра. При расположении мениска в самой узкой части капилляра сложной формы градиент парциального давления у мениска выше, а при расположении в самой широкой части - ниже, чем в цилиндрическом при прочих равных условиях. Это и обуславливает в одном случае увеличение, а в другом - уменьшение скорости испарения по сравнению с цилиндрическим капилляром.

Н.В.Чураевым показано, что при определенных условиях наблюдается пленочный перенос жидкости по стенкам капиллярной системы за счет расклинивающего давления. Пленочное течение жидкости происходит также за счет градиента поверхностного натяжения на поверхности пленки, возникающего благодаря распределению температуры или концентрации растворенных в жидкости веществ.

Дополнительное изменение поверхностного натяжения можно осуществить добавками легколетучего ПАВ. При испарении ПАВ с поверхности пленки концентрация его убывает к устью капилляра, а поверхностное натяжение - возрастает, что было подтверждено экспериментальными исследованиями испарения водных растворов бутилового спирта. В отличие от испарения дистиллированной воды, где наблюдается монотонное снижение скорости испарения по мере углубления мениска, для водных растворов бутилового спирта при определенных радиусах капилляра обнаружены свои особенности. Вслед за ступающим мениском на стенках капилляра образуются утолщения пленки жидкости, которые сливаются в столбик, что переносит фронт испарения ближе к устью капилляра и интенсифицирует процесс удаления жидкости. Всего наблюдалось до трех таких столбиков. Затем, по мере удаления жидкости, наблюдается истощение столбиков, их исчезновение и резкое снижение скорости испарения до уровня интенсивности в капилляре без пленки.

В работе, исходя из известных представлений о переносе влаги в капиллярно - пористых материалах в области гигроскопического состояния с использованием коэффициента диффузионного сопротивления  $\mu_d$ , предложены зависимости для определения интенсивности влагопереноса через воздухопроницаемую оболочку при неизотерми-

ческих условиях с учетом избыточного давления паровоздушной смеси:

$$g_n = \frac{M_n D_0}{R T_0} \frac{P_0}{\int_0^s \mu_d \frac{T_0}{T} dy} \ln \frac{P - p_n}{P - p_n''/\Pi_n}, \quad (4.2)$$

а также величины избыточного давления под оболочкой

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{D_0 \eta_{BO}}{P_0 K \mu_d} \left( \frac{P_0}{P} \right)^2 \frac{2}{1 + \Pi_n} \frac{T_n}{T_0} \left[ \frac{T}{T_0} \frac{\eta_B}{\eta_{BO}} \frac{M_n}{M} \right] \ln \frac{P - p_n}{P - p_n''/\Pi_n}, \quad (4.3)$$

где:  $D_0$  и  $\eta_{BO}$  - коэффициенты диффузии пара и динамической вязкости парогазовой смеси при  $T_0$  и  $P_0$ ;  $\Pi_n = 1 + \Delta P / P$ .

Эти зависимости положены в основу при выводе расчетных формул, описывающих процесс испарения жидкости из одиночных цилиндрических капилляров через воздухопроницаемые оболочки при ее постоянной температуре:

$$g_n = \frac{M_n D_0}{R T_0} \frac{P_0}{\mu_d s + \ell} \left( \frac{T}{T_0} \right)^2 \ln \frac{P - p_n}{P - p_n''/\Pi_n}, \quad (4.4)$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{D_0 \eta_{BO}}{P_0 K} \frac{s}{\mu_d s + \ell} \left( \frac{P_0}{P} \right)^2 \left( \frac{T}{T_0} \right)^2 \frac{2}{1 + \Pi_n} \left[ \frac{\eta_B}{\eta_{BO}} \frac{M_n}{M} \right] \ln \frac{P - p_n}{P - p_n''/\Pi_n}, \quad (4.5)$$

где:  $\left[ \frac{T}{T_0} \frac{\eta_B}{\eta_{BO}} \frac{M_n}{M} \right]_s$  и  $\left[ \frac{\eta_B}{\eta_{BO}} \frac{M_n}{M} \right]_s$  - средние значения в оболочке.

Аналитические исследования процесса испарения жидкости из одиночных капилляров при наличии воздухопроницаемых оболочек показали, что основную роль играет величина диффузионного сопротивления оболочки как на кинетику испарения жидкости, так и на кинетику изменения избыточного давления под оболочкой. Величина же избыточного давления, как следует из зависимости (4.3), определяется произведением  $K \mu_d$ , т.е. зависит как от проницаемости оболочки, так и ее диффузионного сопротивления.

Из формулы (4.4) следует, что между обратной величиной скорости испарения (скорости углубления мениска) и расстоянием до уровня жидкости в капилляре наблюдается линейная зависимость при постоянном значении величины  $\mu_d s$ , что подтверждается проведенными экспериментами (рис.8). Одновременно в опыте измерялась кинетика

испарения из открытого капилляра при тех же условиях, что позволяло определять величину коэффициента диффузионного сопротивления оболочки по разнице уровней в открытом капилляре  $l$  и капилляре с оболочкой  $l_n$  при одном и том же значении скорости испарения в обоих капиллярах:

$$\mu_{дв} = l - l_n \quad (4.6)$$

Коэффициенты фильтрации и проницаемости оболочек определялись по скорости испарения жидкости и величине избыточного давления, возникающего под оболочкой, на U-образной трубке. Короткое колено такой трубки заклеивалось исследуемой оболочкой. Второе колено значительно большей длины сообщается с атмосферой. Заполненный исследуемой жидкостью образец помещался в воздушный термостат. В течение опыта контролировались условия в окружающей среде и периодически производилось измерение уровней жидкости в обоих коленах образца. По разности уровней  $\Delta h = l - l'$  определялась величина избыточного давления паровоздушной смеси под оболочкой. В начале эксперимента наблюдался рост избыточного давления, связанный с прогревом жидкости и увеличением скорости испарения. После достижения максимального значения происходит непрерывное снижение величины избыточного давления. Обратная величина избыточного давления линейно растет с увеличением расстояния  $l$  до уровня жидкости в коротком колене образца.

Количество испаряющейся жидкости определялось по формуле:

$$G_n = \rho \frac{d\bar{l}}{dt} \quad (4.7)$$

где:  $\bar{l} = l + l'$  - суммарное расстояние от оболочки до уровней жидкости в коротком  $l$  и длинном  $l'$  коленах образца.

Обратная величина скорости испарения в образце также растет с увеличением расстояния  $l$ .

Расчетная формула для определения величины коэффициента фильтрации получена из зависимостей (4.4), (4.5) и (4.7):

$$K_{\Phi} = \frac{s}{\rho_{в.ср} g \Delta h} \frac{d\bar{l}}{dt} \quad (4.8)$$

где:  $\rho_{в.ср}$  - средняя плотность парогазовой смеси при температуре опыта и величине среднего парциального давления паров в оболочке.

Проницаемость материала оболочки определялась по величине коэффициента фильтрации и средней вязкости  $\eta_{в.ср}$  парогазовой смеси в оболочке:

$$K = K_{\Phi} \eta_{в.ср} \quad (4.9)$$

Параллельные измерения на образце без оболочки позволили

получить из этого же опыта и величину диффузионного сопротивления изучаемой оболочки [формула (4.6)].

На этом же образце определялись значения коэффициентов фильтрации и проницаемости методом нестационарной фильтрации перед началом и после окончания опытов по испарению жидкости. В длинном колене трубки создавалось разрежение и жидкость поднималась в нем до тех пор, пока уровень в узком колене находился выше изгиба трубки. Затем длинное колено сообщалось с атмосферой, и измерялся ряд значений уровня в различные моменты времени, по которым и определялись разности уровней в трубках. Строилась зависимость разности уровней от времени в полулוגарифмической системе координат. По угловому коэффициенту прямой на начальной стадии вычислялся коэффициент фильтрации по формуле, полученной из закона Дарси:

$$K_{\Phi} = \frac{s}{2} \frac{\ln(\Delta h_0 / \Delta h)}{\rho g t} \quad (4.10)$$

где:  $\Delta h_0$  и  $\Delta h$  - начальное и текущее значения разности уровней в образце.

Экспериментальные исследования испарения воды из одиночных капилляров и U - образного образца проводились в диапазоне температур 30 - 95°C на оболочках из различных видов бумаги, являющейся типичным капиллярно - пористым телом и широко распространенной в качестве упаковочного материала и оболочек на основе бумаги и картона при пародепрессионной сушке материалов. Установлено, что диффузионное сопротивление изучаемых оболочек с повышением температуры снижается, однако это уменьшение невелико. Отклонение от среднего значения в рассмотренном диапазоне не превышает 15% для оболочки из писчей и 4% для чертежной бумаги, и в практических расчетах величину диффузионного сопротивления оболочки данного вида можно принимать постоянной. Показано, что для многослойных оболочек соблюдается закон аддитивности, т.е. диффузионное сопротивление равно сумме сопротивлений составляющих оболочек. Предварительное увлажнение оболочки и повышение влагосодержания теплоносителя приводит к снижению величины диффузионного сопротивления, т.е. к интенсификации влагопереноса через оболочки. Коэффициенты фильтрации и проницаемости исследуемых оболочек практически не зависят от температуры. При этом результаты опытов по испарению влаги и нестационарной фильтрации удовлетворительно согласуются между собой.

В пятой главе рассмотрен механизм пародепрессионной сушки

материалов высокотемпературным высоковлажным теплоносителем.

На основе приведенных выше зависимостей для определения интенсивности влагопереноса через воздухопроницаемую оболочку в неизотермических условиях, с учетом избыточного давления паровоздушной смеси получены аналитические зависимости и разработана методика расчета на ПЭВМ температуры материала в первом периоде пародепрессионной сушки с учетом диффузионного сопротивления  $\mu_d$  и величины проницаемости капиллярно-пористой оболочки при условии, что теплота, подведенная к поверхности материала через оболочку, полностью расходуется на испарение влаги, а между процессами внешнего тепло- и массообмена существует приближенная аналогия. При выводе расчетной формулы для определения температуры материала использована квадратичная аппроксимация зависимости давления насыщенных паров от температуры:

$$p_n'' = \ell_p t_m^2 + n_p t_m + m_p, \quad (5.1)$$

где:  $\ell_p$ ,  $n_p$ ,  $m_p$  - эмпирические коэффициенты, постоянные для определенных интервалов температуры.

Расчет температуры материала производился по следующей формуле:

$$t_m = \frac{-(n_p + K_B) + \sqrt{(n_p + K_B)^2 + 4\ell_p(K_B t_c - m_p + P_{no})}}{2\ell_p}. \quad (5.2)$$

В этой зависимости коэффициент  $K_B$  характеризует относительную величину теплопроводности и массопереноса в пограничном слое и оболочке:

$$K_B = \frac{\lambda_{во} R T_0}{r_{ио} D_0 M_n} \frac{P}{P_0} \frac{1 + Bi_m}{1 + Bi_q} \frac{(1 - 0,24 \bar{P}_{нср})(1 - \bar{P}_{нср})}{1 - E_r t_m}, \quad (5.3)$$

где:  $\lambda_{во}$  и  $r_{ио}$  - коэффициент теплопроводности сухого газа и теплота испарения жидкости при  $t = 0^\circ\text{C}$ ;  $E_r$  - температурный коэффициент теплоты испарения.

Показано, что массообменное число  $Bi_m$  зависит от числа  $Bi_q$  и тепловлажностных условий в зоне испарения под оболочкой и в окружающей среде:

$$Bi_m = \frac{1 - \left[ \frac{P - p_n''}{P - p} \right] \left[ \frac{P - P_{no}}{P - p'' / P_v} \right] \frac{1}{1 + Bi_{m0}}}{\left[ \frac{P - P_{no}}{P - p'' / \Pi} \right] \frac{1}{1 + Bi_{m0}} - 1}, \quad (5.4)$$

где:  $Bi_{m0} = Bi_q K_{00} \frac{T_B}{T_s}$ ;  $K_{00} = \mu_d \frac{\lambda_B}{\lambda_B} \left[ \frac{P_{r_m}}{P_r} \right]^m$ ;  $T_s$  и  $T_B$  - сред-

ние значения температур оболочки и газа в пограничном слое;  $m = 0,3 - 0,43$  - показатель степени, зависящий от режима течения парогазовой смеси и характера обтекания поверхности.

После ввода исходных данных, осуществляется автоматически выбор коэффициентов  $l_p$ ,  $n_p$  и  $m_p$ , производится расчет величин, входящих в расчетную формулу. Температура материала определяется методом хорды - секущей в интервале существования решения.

Анализ полученных результатов (рис.9) доказал, что при паро-депрессивной сушке материалов наблюдается более резкий рост температуры материала с повышением температуры теплоносителя по сравнению с методом сушки высокотемпературным высоковлажным теплоносителем. Причем, уровень температуры материала тем больше, чем больше толщина оболочки при прочих равных условиях или ее диффузионное сопротивление. Интенсификация внутреннего массопереноса за счет повышения температуры материала приводит к изменению относительного критического влагосодержания, которое определялось по формуле, полученной с использованием известной зависимости А.В.Лькова для нахождения критического влагосодержания при конвективной сушке материалов:

$$\theta_{kp} = \frac{U_{kp} - U_{kn}}{U_{kpo} - U_{kno}} = \frac{N}{N_0} \left[ \frac{T_{m0}}{T_m} \right]^n, \quad (5.5)$$

где:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{\alpha}{\alpha_0} \frac{t_c - t_m}{t_{co} - t_{mo}} \frac{1}{1 + Bi_q} \frac{1 - E_r t_{m0}}{1 - E_r t_m} - \text{представ-}$$

ляет собой относительную величину скорости сушки в первом периоде с учетом свойств воздухопроницаемых оболочек;  $t_c$  и  $t_m$  - температуры теплоносителя и материала;  $U_{kn}$  и  $U_{kno}$  - влагосодержание поверхности материала при средних значениях критического влагосодержания ( $U_{kp}$  и  $U_{kpo}$ ) и скорости сушки в первом периоде ( $N$  и  $N_0$ ) в рассматриваемых и исходных условиях.

Повышение влагосодержания теплоносителя при его неизменной температуре приводит к уменьшению относительного критического влагосодержания как за счет снижения скорости сушки в первом периоде, так и за счет интенсификации внутреннего влагопереноса. Снижение скорости сушки можно компенсировать повышением температурного уровня процесса. Так, если принять  $\theta_{kp} = 1$ , т.е. не до-

пустить увеличения критического влагосодержания материала, то при  $p_{no} = 1,33 \cdot 10^4$  Па, например, повышение температуры теплоносителя до  $96^\circ\text{C}$  при  $n = 5,0$  позволяет увеличить скорость сушки на 40% по сравнению с исходным вариантом ( $t_c = 60^\circ\text{C}$  и  $p_{no} = 1,33 \cdot 10^3$  Па). Реализация преимуществ данного метода ограничивается реальными возможностями создания высокого влагосодержания в сушильных установках, а наибольший эффект может быть достигнут при переходе к сушке перегретым паром, когда температура материала станет равной температуре насыщения при данном давлении.

Более эффективным способом повышения температуры материала в процессе конвективной сушки является применение воздухопроницаемых капиллярно-пористых коллоидных оболочек. Повышением температуры теплоносителя при этом удается не только компенсировать термическое сопротивление оболочки, но и ускорить процесс сушки в целом. Возможная степень увеличения скорости сушки  $E_N$  при одновременном увеличении толщины оболочки ( $Bi_q$ ) и соответствующем росте температуры теплоносителя за счет повышения температуры материала показана на рис.5.2. Кривые получены при  $\theta_{кр} = 1$  и  $n=5,0$ . Предельная интенсификация процесса сушки целиком определяется предельным ускорением внутреннего влагопереноса за счет приближения температуры материала к  $t_m = 100^\circ\text{C}$ .

Степень интенсификации процесса сушки определяется характером зависимости коэффициента диффузии влаги в материале от температуры. Установлено, что применение капиллярно-пористых оболочек целесообразно при значении теплового числа Био меньшем 0,5, т.к. предельная интенсификация процесса сушки будет наблюдаться при более низком уровне температуры теплоносителя. Кроме того, создаются благоприятные условия для пленочного переноса жидкости по стенкам капилляров за счет расклинивающего давления, что сказывается на интенсивности внутреннего влагопереноса при углублении зоны испарения в капиллярно-пористых материалах. Избыточное давление, возникающее под герметичной оболочкой и зависящее от ее проницаемости, позволяет дополнительно интенсифицировать внутренний влагоперенос и ускорить процесс сушки в целом.

Таким образом, под пародепрессионной сушкой следует понимать процесс сушки материала, помещенного в воздухопроницаемые оболочки, под которыми возможно повышение давления паровоздушной смеси за счет фильтрационного сопротивления ее перемещению в оболочке.

Проведенный анализ механизма пародепрессионной сушки

материалов подтверждается экспериментальными исследованиями массопереноса при сушке капиллярно-пористого тела - листовой гипсовой штукатурки и капиллярно-пористого коллоидного тела - вискозного волокна в виде паковок, помещенных в воздухопроницаемые оболочки различной структуры. Причем, расчетные и измеренные значения температуры материала в первом периоде сушки гипсовой пластины без оболочки и армированной картоном удовлетворительно согласуются между собой.

Шестая глава посвящена исследованиям механизма испарения воды из одиночных капилляров через полупроницаемую мембранную оболочку.

Получены формулы для определения потока массы из одиночного капилляра, закрытого полупроницаемой оболочкой, и давления паровоздушной смеси в капилляре с использованием уравнения материального баланса воздуха под оболочкой и известных зависимостей для потоков пара через оболочку и в капилляре:

$$\varepsilon_n = \frac{p_n'' - p_n}{\frac{s}{K_p} + \frac{\Delta p_{n1}}{\varepsilon_{n1}} \left[ 1 + W \left( \frac{\ell}{\ell_1} - 1 \right) \right]}, \quad (6.1)$$

$$P = I_n'' + \frac{p_n'' - p_n \cdot K_n \left[ 1 + W \left( \frac{\ell}{\ell_1} - 1 \right) \right]}{\exp \left( N_p \frac{\ell}{\ell} \right) - 1 + K_n \left[ 1 + W \left( \frac{\ell}{\ell_1} - 1 \right) \right]}. \quad (6.2)$$

В этих формулах:

$\varepsilon_{n1}$  - поток пара в открытом капилляре в момент закрытия его полупроницаемой оболочкой при  $T_1$ ,  $p_1$ ,  $p_{n1}$  и  $p_{n1}''$ ;  $\Delta p_{n1} = p_{n1}'' - p_{n1}$ ;

$N_p = \frac{T_1}{T} \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{n1}} \ln \frac{p_1 - p_{n1}}{p_1 - p_{n1}''}$  - комплекс, характеризующий

распределение пара в капилляре;

$W = \frac{\omega_1}{\rho_{в0}} \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{n1}} \frac{p_0}{p_1 - p_{n1}}$  - комплекс, учитывающий растворенный в жидкости воздух, растворимость которого  $\omega_1$ ;  $\rho_{в0}$  - плотность воздуха при нормальных условиях.

Анализ полученных зависимостей показал, что в начальный момент возникает избыточное давление вследствие сопротивления массопереносу и заполнения пространства под оболочкой парами жидкости. По мере углубления мениска в изолированном капилляре избыточное давление под оболочкой снижается и сменяется все более

возрастающим разрежением в капилляре. При бесконечно большом углублении мениска давление под оболочкой стремится к предельному значению, равному давлению насыщенных паров при данной температуре. Такое изменение давления под оболочкой в случае, если количеством растворенного в жидкости воздуха можно пренебречь, обуславливает постоянную скорость перемещения мениска в процессе испарения. Скорость испарения определяется первоначальным положением мениска  $l_1$  и ее величина тем больше, чем меньше  $l_1$ , т.е. чем меньше количество воздуха под оболочкой.

Описанный механизм массопереноса был подтвержден экспериментальными исследованиями процесса испарения воды из одиночного капилляра, открытый конец которого герметично закрывался целлофановой оболочкой (рис.11). При закрытии капилляра оболочкой скорость испарения резко падает. Вследствие увеличения разности давлений по обе стороны мембраны при углублении мениска возникают механические напряжения в материале и оболочка деформируется, втягиваясь внутрь капиллярной трубки до определенного предела. Паропроницаемость пленки при этом снижается, а после завершения деформации - остается постоянной, после чего интенсивность испарения стабилизируется. В случае испарения при постоянном давлении под оболочкой скорость испарения с углублением мениска непрерывно снижается так же, как и при испарении жидкости через капиллярно-пористые воздухопроницаемые оболочки.

Паропроницаемость полимерной пленки практически не меняется при испарении из U - образной модели, в которой один конец закрыт оболочкой, а второй, гораздо большей длины, сообщается с атмосферой (рис.12). Давление под оболочкой снижается с течением времени, но его изменение пренебрежимо мало по сравнению с атмосферным давлением (рис.13).

Аналитические зависимости, описывающие процесс испарения из U - образной модели, позволили предложить методику экспериментального определения коэффициента паропроницаемости мембранной оболочки по скорости испарения из открытой U - образной модели и модели с оболочкой. Параллельно измерялось количество испарившейся жидкости в обеих моделях, определялась скорость испарения  $dl/dt$  и изменение давления в окружающей среде и под оболочкой. В момент времени, когда  $dh = 0$ , измеряются общее давление и парциальное давление паров в окружающей среде, а также величина углубления мениска под оболочкой  $l_1$ . По равенству скоростей испарения в обеих моделях определяется величина углубления  $l$  в открытой

модели. Величина паропроницаемости на основании этих измерений вычислялась по зависимости:

$$\frac{K_p}{v} = \frac{\rho}{(P - P_n) \left[ 1 - \exp \left( \frac{l - l_1}{E} \frac{d\bar{l}}{dt} \right) \right]} \frac{d\bar{l}}{dt}, \quad (6.3)$$

где:  $E = \frac{D_{po}}{\rho} \frac{T}{t}$  - величина, характеризующая интенсивность диффузионного переноса пара в капиллярной трубке.

Результаты экспериментального определения величины паропроницаемости целлофановой оболочки показали, что в области температур 40-50°C наблюдается резкое снижение коэффициента паропроницаемости вследствие перехода из стеклообразного состояния в аморфное, что согласуется с данными, опубликованными в литературе. В диапазоне же температур 60-80°C величина паропроницаемости остается практически неизменной. В этой зоне интенсифицирующее влияние температуры компенсируется структурными изменениями в материале.

Различие механизма испарения воды из одиночных капилляров через воздухопроницаемые и непроницаемые для воздуха оболочки позволило предложить метод анализа пористой структуры материала в виде тонкой оболочки по величине давления под оболочкой при испарении из U - образной модели. Для воздухопроницаемых оболочек, т.е. в случае, когда в материале имеются сквозные поры, в пространстве под оболочкой возникает давление, которое уменьшается по мере углубления мениска, оставаясь все время больше атмосферного. При отсутствии сквозных пор давление под оболочкой линейно уменьшается с течением времени и под оболочкой возникает затем разрежение, которое непрерывно возрастает (рис 13).

Целлофановые и бумажные оболочки различной структуры, имеющие одинаковые химическую природу и вид кривых равновесного состояния, относятся к коллоидным капиллярно-пористым материалам по классификации А.В.Лыкова, принадлежат к различным группам по классификации С.П.Рудобашты: целлофан - непористое тело, бумага - капиллярно-пористое тело. Анализ по данной методике показал, что некоторые материалы являются непористыми (кожура рыбы, кожица сливы и винограда, колбасные оболочки и др.) и при сушке материалов с такими оболочками необходимо учитывать их влияние на механизм внутреннего влагопереноса.

В седьмой главе представлены способы управления интенсивностью тепломассопереноса в твердых дисперсных материалах, которые

были использованы при разработке конкретных теплома́ссовых технологических процессов различных отраслей промышленности.

На основе анализа литературных данных и результатов настоящей работы предложен ряд способов управления процессами внутреннего массопереноса: изменение температуры материала, добавки неионогенных ПАВ и электролитов, воздействие на структуру материала, переход к обработке материалов в виде элементов с минимально возможными по технологическим соображениям геометрическими размерами и др. Практическое осуществление этих способов отличается большим разнообразием и зависит от конкретных условий и параметров протекания технологических процессов. Необходимо отметить, что способы ускорения внутреннего влагопереноса при сушке материалов имеют специфические особенности.

Положительный эффект интенсификации внутреннего влагопереноса наряду с использованием интенсифицирующего влияния температуры в описанных в главе 5 методах сушки можно получить за счет подогрева массивного материала перед сушкой высокотемпературным теплоносителем с высоким влагосодержанием ( $d = 300$  г/кг.с.в.), что было использовано в ИТТФ НАН Украины при создании способов сушки коконов и вязкого шелка в куличах. Прогрев осуществлялся за счет конденсации водяных паров на поверхности материала. Повышенный уровень температур и благоприятное направление теплового потока из внутренних слоев к поверхностным обеспечивают ускорение сушки в целом, несмотря на увлажнение в начале процесса.

Анализ обезвоживания двухкапиллярной модели капиллярно-пористого тела и экспериментальных исследований процесса сушки искусственных волокон показал, что переход от сушки вязкого шелка в куличах к сушке в виде одиночных волокон приводит к принципиальному изменению механизма сушки. Величина критического влагосодержания материала при сушке одиночных волокон близка к величине максимально-гигроскопического влагосодержания, и процесс удаления влаги во втором периоде сушки целиком определяется физико-химическими свойствами материала, а также параметрами теплоносителя. Переход к обработке материалов в виде элементов минимально возможных геометрических размеров, измельчение материала в допустимых пределах или его гранулирование позволяет уменьшить или вообще ликвидировать лимитирующее влияние скорости внутреннего массопереноса на процесс сушки.

При сушке шелковичных коконов осуществляется пародепрессионный способ сушки с применением высокотемпературного высоко-

влажного теплоносителя, поскольку практически вся удаляемая влага содержится в куколке, находящейся внутри кокона и окруженной шелковой оболочкой. Повышение температуры теплоносителя до 100-120°C с одновременным увеличением его влагосодержания до 125-130 г/кг с.в. позволило сократить время сушки в 3-5 раз по сравнению с существующим способом ( $t = 80^\circ\text{C}$ ,  $d = 10$  г/кг с.в., время сушки 14-15 часов) за счет повышения температуры материала и ускорения внутреннего влагопереноса.

На предприятиях Министерства сельского хозяйства и легкой промышленности СССР было внедрено свыше 400 агрегатов КСК-4,5 и 60 агрегатов СК-150К, реализующих указанный режим сушки.

Для сушки искусственного шелка в куличах ИТТФ НАН Украины и Киевским комбинатом искусственного волокна была создана зональная сушильная установка типа СВШ, в первой зоне которой осуществлен предварительный прогрев материала, что приводит к уменьшению неравномерности структуры нити в начале и конце кулича. Производительность установки была увеличена в 3,5-6 раз, производственные площади, занимаемые сушильным оборудованием, сокращены в 2-2,5 раза, а объем незавершенного производства - в 4-5 раз.

Сушильные установки типа СВШ внедрены на Киевском и Балаковском комбинатах химического волокна.

Высокотемпературный высококислотный теплоноситель был использован при создании способа обработки прессовочного дозирующегося стекловолнока путем замены части просасываемого через установку воздуха перегретым паром, что позволило увеличить производительность установки, сократить отходы получаемой продукции и повысить пожаро- и взрывобезопасность. Способ был реализован на Ступинском заводе стекловолокон.

При разработке технологической линии промышленного приготовления льнотресты термобиологическим способом применены методы повышения температуры материала и перехода к его обработке практически в виде одиночных элементов благодаря контейнерам специальной конструкции с вертикальным расположением снопов.

Подогрев воды до 70 - 95°C на стадии первой гидротермической обработки обеспечил быстрое и равномерное увлажнение материала, экстракцию из него водорастворимых соединений, отмывку от загрязнений, расширение пор растительной ткани и пастеризацию. В результате ускорился последующий процесс мочки в регенерированной мочильной жидкости в 1,5 - 2 раза. Следует отметить, что использование неионогенного ПАВ (ОП-10) позволяет сократить время пер-

вой гидротермической обработки, получить шелковистое льноволокно, но несколько удлиняет процесс мочки. На стадии второй гидротермической обработки в подогретой воде ( $t=50^{\circ}\text{C}$ ) происходит остановка биологических процессов мочки и качественная промывка материала.

Дальнейшая обработка льнотресты осуществляется в однорусной сушильной установке с продуваемым слоем, а последующая гидротермическая обработка материала - паровоздушной смесью с определенной относительной влажностью, что обеспечивает улучшение его физико-механических свойств.

Предложенная технология, внедренная на Макаровском льнозаводе Киевской области, позволила сократить длительность процесса в 1,5-2 раза, уменьшить удельные потребления теплоты, электроэнергии, воды, устранить специфический запах, обеспечить равномерную обработку сырья во всем объеме и увеличить выход длинного волокна по сравнению с традиционным способом.

Основным процессом безотходных технологий получения пищевых красителей на основе столовой свеклы и переработки яблочных выжимок на порошки является сушка. Для обеспечения высокой скорости сушки материал непосредственно после отжима сока формуют на тела правильной геометрической формы с минимально возможными размерами. Сочетание с двухстадийным управляемым режимом сушки обеспечивает высокое качество получаемой пищевой продукции и различную цветовую гамму красителя на основе столовой свеклы.

Технологические линии получения пищевых красителей внедрены на 6 предприятиях Украины и России. Свыше 40 технологических линий по производству порошков из яблочных выжимок внедрено в странах СНГ, одна линия - в Чехословакии.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении работы установлены физические представления о массопереносе в моделях пористых тел и капиллярно-пористых материалах, являющиеся научными основами управления процессами внутреннего массопереноса за счет изменения температуры материала, его структурных характеристик и применения неионогенных поверхностно-активных веществ, а также воздухопроницаемых и полупроницаемых оболочек. В результате:

1. Получены аналитические зависимости, описывающие процесс движения жидкости в цилиндрических капиллярах при скачкообразном и гиперболическом характере изменения вязкости в граничном слое. Установлены показатели степени в температурной зависимости ско-

рости переноса влаги в одиночных капиллярах и различным характере изменения вязкости в граничном слое. Показано, что на увеличение скорости движения жидкости в капиллярах и капиллярно - пористых телах при  $\delta < 0,25$  более эффективно уменьшение толщины граничного слоя, а при  $\delta > 0,5$  - вязкости в нем.

2. Получено дифференциальное уравнение движения жидкости в горизонтальных конических капиллярах с учетом сил трения вытесняемого воздуха. Установлено, что скорость движения жидкости в суживающемся к устью капилляре выше, чем в цилиндрическом с одинаковым значением начального радиуса за счет уменьшения сопротивления в широкой части. При этом силы трения вытесняемого воздуха оказывают существенное влияние на скорость движения в суживающихся капиллярах и их влияние пренебрежимо мало в расширяющихся к устью капиллярах.

3. Получены дифференциальные уравнения движения жидкости при ее капиллярном впитывании двухкапиллярной моделью пористого тела. Исследованиями установлено, что сопротивление перетоку жидкости из широкого капилляра в узкий оказывает сильное влияние в начальной стадии пропитки. При этом скорость перемещения мениска в узком капилляре выше, а в широком - ниже, чем в изолированных капиллярах такого же радиуса.

4. Показано, что скорость капиллярного впитывания жидкости тонкопористыми материалами можно повысить за счет соединения их с крупнопористыми материалами.

5. Установлено, что для двухкапиллярной модели без сопротивления значения коэффициентов фильтрации при капиллярном впитывании и при стационарной фильтрации одинаковы, в то время как для изолированной системы разновеликих капилляров наблюдаются значительные расхождения.

6. Экспериментальными исследованиями воздействия добавок неионногенных поверхностно-активных веществ на процесс капиллярного впитывания воды капиллярно-пористыми и капиллярно-пористыми коллоидными материалами установлено увеличение темпа пропитки в 3-7 раз. Причем, эффект воздействия ПАВ существенно зависит от структурных характеристик материала. Установлен механизм воздействия ПАВ на влагоперенос в виде жидкости. Наблюдаются две области концентраций резкого увеличения скорости влагопереноса, которым соответствует формирование различно ориентированных слоев, что позволяет определить оптимальные концентрации применения ПАВ по изотермам адсорбции из растворов дисперсными материалами.

7. Изучено влияние изменения сечения одиночных капилляров вдоль их оси на скорость испарения. Показано, что в расширяющихся к устью капиллярах интенсивность испарения выше, а в суживающихся ниже, чем в цилиндрическом капилляре при прочих равных условиях.

8. Получены аналитические зависимости для расчета интенсивности массопереноса через капиллярно-пористые воздухопроницаемые оболочки в неизотермических условиях с учетом фильтрационного переноса парогазовой смеси.

9. Разработана методика комплексного экспериментального определения коэффициентов диффузионного сопротивления, фильтрации парогазовой смеси и проницаемости воздухопроницаемых оболочек по скорости испарения на двух U - образных моделях с оболочкой и без нее с последующим контрольным определением коэффициента фильтрации на этой же установке методом нестационарной фильтрации.

10. Изучено влияние температуры на величины коэффициентов диффузионного сопротивления, фильтрации и проницаемости для двух видов бумажной оболочки. Показано, что диффузионное сопротивление с ростом температуры уменьшается, в то время как коэффициент проницаемости практически не зависит от температуры. Установлено качественное влияние влагосодержания теплоносителя и предварительного увлажнения оболочки на величину диффузионного сопротивления.

11. Получены аналитические зависимости для определения температуры материала в первом периоде сушки при наличии паропроницаемых оболочек, разработана методика и программа расчета на ПЭВМ величины избыточного давления под оболочкой и температуры материала в первом периоде пародепрессионной сушки. Степень интенсификации процесса сушки определяется характером зависимости коэффициента диффузии влаги в материале от температуры. Установлено предельное значение числа  $Bi_q$ , при котором наблюдается максимальное ускорение внутреннего влагопереноса. Показано, что для полупроницаемых оболочек основными параметрами, определяющими скорость испарения влаги, являются интенсивность внешнего теплообмена и проницаемость оболочки.

12. Получены аналитические зависимости для определения величины давления под полупроницаемой оболочкой, а также скорости испарения из одиночных и сообщающихся (U - образной модели) капилляров. Установлено, что скорость испарения влаги из капилляров с полупроницаемыми оболочками остается постоянной и определяется свойствами оболочки и количеством воздуха в капилляре, а под оболочкой возникает разрежение, увеличивающееся по мере углубления

мениока и интенсифицирующее влагоперенос в капилляре.

13. Разработана методика определения коэффициента паропроницаемости полупроницаемых оболочек по испарению жидкости из сообщающихся капилляров.

14. На основании исследований процесса испарения из сообщающихся капилляров разработан метод анализа пористой структуры по величине давления под оболочкой, характер изменения которого позволяет судить об эластичности пор и структурных изменениях в материале при сушке.

15. Предложены способы управления процессами внутреннего массопереноса, использованные при создании и внедрении высокоинтенсивных способов сушки коконов, вязкого шелка в куличах, дозирующегося стекловолкнита, а также технологических линий промышленной переработки льна, производства пищевого красителя на основе столовой свеклы и переработки яблочных выжимок.

Основными из опубликованных работ являются:

1. Боровский В.Р., Шелиманов В.А. Теплообмен цилиндрических тел малых радиусов и их систем.- Киев: Наукова думка, 1985.- 208 с.

2. Кремнев О.А., Боровский В.Р., Шелиманов В.А. Процессы перемещения влаги в материалах // В кн. Скоростная сушка.- Киев: Гостехиздат УССР, 1963.- С.120-138.

3. Шелиманов В.А. Високотемпературная сушка влажным теплоносителем // Тр. 2-я теплотехнич. конференц. молод. исслед. 22-23 апреля 1962 г.- Киев: Наукова думка, 1963.- С.102 - 107.

4. Шелиманов В.А. Исследование влияния температурных полей на перенос влаги в капиллярах // Сб. Теплофизика и теплотехника.- Киев: Наукова думка, 1964.- С.307-312.

5. Кремнев О.А., Боровский В.Р., Пиевский И.М., Шелиманов В.А. Пародепресссионный метод сушки материалов високотемпературным теплоносителем // Сб. Теплофизика и теплотехника.- Киев: Наукова думка, 1964.- С.321-326.

6. Боровский В.Р., Быкова Г.П., Кремнев О.А., Шелиманов В.А. Исследование коэффициента потенциалопроводности при различных видах перемещения влаги в материалах // Сб. Теплофизические свойства веществ. - Киев: Наукова думка, 1966.- С.27-31.

7. Боровский В.Р., Быкова Г.П., Кремнев О.А., Шелиманов В.А. Исследование коэффициента потенциалопроводности при различных температурах материала // Сб. Теплофизические свойства веществ.- Киев: Наукова думка.- 1966.- С.44-51.

8. Шелиманов В.А., Коросташ М.Д., Верещагина Л.И. О влиянии

структуры материала на перенос влаги // Сб. Тепло- и массообмен в хим. технологии.- Киев: Наукова думка, 1967.- С.86-93.

9. Мустяца В.Т., Кремнев О.А., Боровский В.Р., Шелиманов В.А. О переносе влаги внутри капиллярно-пористых тел при наложении высокочастотных электрических полей // Техн. электромагнитная гидродинамика.- М.: Металлургия, 1967.- №.- С.342-350.

10. Боровский В.Р., Шелиманов В.А., Коросташ М.Д. и др. Исследование влияния поверхностно-активных веществ на влагоперенос в капиллярно-пористом коллоидном теле // Тепло- и массоперенос.-1968.- Т.6.- Ч.2.- С.273-276.

11. Боровский В.Р., Коросташ М.Д., Шелиманов В.А. и др. Влияние поверхностно-активных веществ на сушку искусственных волокон в жгутах // Хим. волокна.- 1968.- №1.- С.40-42.

12. Кремнев О.А., Боровский В.Р., Шелиманов В.А. и др. Сушка вискозного волокна с предварительной тепловлажностной обработкой // Хим. волокна.-1969.- №2.- С.40-41.

13. Боровский В.Р., Шелиманов В.А., Павлюк Л.П., Прудяк Д.Р. Исследование переноса растворов неионогенных поверхностно-активных веществ в капиллярно-пористом коллоидном теле при капиллярной пропитке // Теплофизика и теплотехника. - 1970.- Вып.16. - С.66-68.

14. Боровский В.Р., Шелиманов В.А., Коросташ М.Д., Быкова Г.П. Исследование влияния термовлажностной обработки вискозного волокна в процессах сушки на его структуру // Теплофизика и теплотехника. - 1970.- Вып.17.- С.146-148.

15. Кремнев О.А., Боровский В.Р., Шелиманов В.А. и др. Исследование влияния плотности оболочек на процесс сушки вискозного шелка в куличах // Теплофизика и теплотехника. - 1970.- Вып.18.- С.117-121.

16. Шелиманов В.А., Павлюк Л.П. Воздействие неионогенного поверхностно-активного вещества (бутилового спирта) на влагоперенос при капиллярной пропитке материалов различной пористой структуры // Сб. Вопросы техн.теплофизики. Вып.3.- Киев: Наукова думка.- 1971.- С.144-147.

17. Шелиманов В.А., Прудяк Д.Р., Никольченко Л.Я. Кинетика впитывания водных растворов поверхностно-активных веществ одиночными капиллярами // Сб. Вопросы техн.теплофизики. Вып.3.- Киев: Наукова думка.- 1971.- С. 147-150.

18. Боровский В.Р., Шелиманов В.А., Павлюк Л.П. Влияние раствора ПАВ (бутилового спирта) на скорость влагопереноса в капиллярно-пористом теле // Теплофизика и теплотехника.- 1970.-

Вып. 19.- С.57-59.

19. Кремнев О.А., Боровский В.Р., Шелиманов В.А. и др. О воздействии неионогенных поверхностно-активных веществ на влагоперенос в капиллярно-пористых телах // Теплофизика и теплотехника.- 1972.- Вып.21.- С.16-18.

20. Кремнев О.А., Боровский В.Р., Шелиманов В.А. и др. Некоторые вопросы механизма движения жидкости в моделях пористых тел под действием капиллярных сил // Тепло- и массоперенос.- 1972.- Т.6.- С.44-48.

21. Кремнев О.А., Боровский В.Р., Шелиманов В.А. и др. О влиянии поверхностно-активных веществ на движение жидкости в цилиндрических трубках под действием капиллярных сил // Теплофизика и теплотехника.- 1972.- Вып.22.- С.10-12.

22. Шелиманов В.А., Прудяк Д.Р. Испарение водных растворов поверхностно-активных веществ из цилиндрических капилляров // Сб. Вопросы технической теплофизики.- Киев: Наукова думка.- 1973.- Вып.4.- С.34-37.

23. Боровский В.Р., Шелиманов В.А., Шаркова Н.А. Интенсификация процесса сушки одиночной движущейся вязкозной нити // Теплофизика и теплотехника.- 1973.- Вып.-23.- С.82-84.

24. Кремнев В.А., Боровский В.Р., Шелиманов В.А., Прудяк Д.Р. Исследование процесса движения жидкости по сообщающимся капиллярам // Теплофизика и теплотехника. - 1973.- Вып.24.-С.14-17.

25. Кремнев О.А., Боровский В.Р., Шелиманов В.А. и др. Изучение темпа пропитки модельных пористых тел // Теплофизика и теплотехника.- 1973.- Вып.24.- С.33-35.

26. Боровский В.Р., Шелиманов В.А., Быкове Г.П. Изучение сорбционных свойств натурального и искусственного шелкового волокна // Теплофизика и теплотехника.- 1973.- Вып.25.- С.50-52.

27. Кремнев О.А., Боровский В.Р., Шелиманов В.А. и др. Влияние термовлажностной сушки на структуру искусственного волокна // Хим.технология - 1974.- №.- С.25-27.

28. Кремнев О.А., Боровский В.Р., Коросташ М.Д., Шелиманов В.А. Исследование влияния паропроницаемых оболочек на процесс сушки искусственных волокон в куличах // Теплофизика и теплотехника.- 1974.- Вып.26.- С.84-88.

29. Кремнев О.А., Боровский В.Р., Шелиманов В.А., Прудяк Д.Р. Испарение жидкости из конических капилляров // Теплофизика и теплотехника.- 1974.- Вып.27.-С.13-15.

30. Кремнев О.А., Шелиманов В.А., Прудяк Д.Р. Исследование

процесса испарения жидкостей из капилляров сложной формы // Всесоюз. науч.-техн. конф. по интенсификации процессов сушки и использованию новой техники. Секц.1. Теория сушки: Докл.- Минск, 1977.- С.122-126.

31. Шелиманов В.А., Прудяк Д.Р. Изучение влияния температуры на влагоперенос в паропроницаемых оболочках // Разработка и внедрение высокоэффективных сушильных установок: Докл. Респ. научн. техн. сов. Вып.1.- Симферополь, 1978.- Киев: УкрНИИТИ.-1978.- С.59-60.

32. Кремнев О.А., Боровский В.Р., Шелиманов В.А. и др. Исследование механизма капиллярного впитывания жидкости на двухкапиллярной модели // Сб. Интенсификация тепловлагопереноса в процессах сушки.- Киев: Наукова думка. - 1979.- С.3-13.

33. Боровский В.Р., Шелиманов В.А., Грабов Л.Н. Исследование процесса конвективной сушки одиночного кокона // Реф.науч.-технич.сб. "Шелк".- 1980.- №5.- С.18-19.

34. Боровский В.Р., Шелиманов В.А., Прудяк Д.Р., Быкова Г.П. Влияние начального влагосодержания паропроницаемой оболочки на ее диффузионное сопротивление // Всесоюзная научно-технич.конф.по дальнейшему совершенств.теории, техники и технологии сушки 10-12 июня 1981 г.- Чернигов.- Секц.1.- Минск: ИТМО АН БССР.- 1981.- С.123-125.

35. Боровский В.Р., Шаркова Н.А., Шелиманов В.А., Полищук Р.Я. Кинетика сушки одиночной движущейся нити при продольном и поперечном обтекании ее теплоносителем // Пром.теплотехника.- 1981.- Т.3.- №6.- С.52-55.

36. Боровский В.Р., Демченко В.В., Шелиманов В.А. и др. Изменение красящих пигментов выжимок столовой свеклы в процессе сушки // Пищевая пром.- 1984.- №1.- С.36-38.

37. Боровский В.Р., Демченко В.В., Грабошеникова В.И., Шелиманов В.А. Изменение структуры выжимок столовой свеклы при удалении влаги различных видов в процессе сушки // Пром.теплотехника.- 1984.-Т.6.- №3.- С.72-75.

38. Шелиманов В.А., Быкова Г.П., Прудяк Д.Р. Влагоперенос при испарении через оболочки различной структуры // В кн. Процессы переноса теплоты и вещества / Сб.науч.труд.- Киев: Наукова думка, 1985.- С.118-121.

39. Демченко В.В., Шелиманов В.А. Изменение пигментов выжимок столовой свеклы при обезвоживании // Плодоовощ. хозяйство.- 1986.- №9.- С.61-63.

40. Шелиманов В.А., Прудяк Д.Р. Особенности процесса испарения жидкостей из одиночных капилляров при наличии мембранных оболочек // Пром.теплотехника, 1989, Т. 11, N1. С.78-82.

41: Шелиманов В.А. Влияние свойств капиллярно-пористых оболочек на интенсивность внутреннего влагопереноса в первом периоде пародепрессионной сушки материала // Междун.конф. по сушке: Докл.2-го Междун.форума по тепло- и массообмену.- Киев, 1992.- С.344-346.

Авторские свидетельства:

42. А.с. 300733. Способ сушки капиллярно-пористых материалов / Кремнев О.А., Боровский В.Р., Пиевский И.М., Шелиманов В.А., Чавдаров А.С., Кравец С.С., Ларский Г.Н. / - 1971.- 1с.

43. А.с.338573. Способ термоконденсационной обработки искусственного волокна / Кремнев О.А.,Боровский В.Р.,Коросташ М.Д.,Шелиманов В.А., Шимко И.Г., Ставцов А.К./- 1972.- 2 с.

44. А.с.537534 Способ тепловой обработки нити из химического и натурального волокна /Кремнев О.А.,Боровский В.Р.,Шаркова Н.А., Шелиманов В.А.,Луценко В.Н./ - 1976.- 3 с..

45. А.с.741624. Способ сушки сырокопченых колбас./Кремнев О.А., Боровский В.Р., Кравец С.С., Шелиманов В.А., Ларский П.Н., Алексеенко В.Е./.- 1980.- 5 с.

46. А.с.759079. Способ сушки яблочной выжимки. /Крупко С.И., Кремнев О.А., Боровский В.Р., Шелиманов В.А., Чавдаров А.С., Снежкин Ю.Ф., Крижановский И.С./.- 1980.- 4 с.

47. А.с.896347. Многозонная сушилка. /Боровский В.Р., Мишнаевский Л.М.-Г., Лизак Л.С., Павлович О.Н., Савченко Н.А., Шеренковский Э.В., Шелиманов В.А./.- 1981.- 4 с.

48. А.с.939604. способ тепловой биологической мочки стеблей льна. /Боровский В.Р., Шелиманов В.А., Грабов Л.Н., Любезников Д.А., Кремнев В.О., Быкова Г.П./.- 1982.- 4 с.

49. А.с.949459. Способ определения влажности материала и устройство для его осуществления. /Безрядин Н.А., Боровиков Ю.С., Боровский В.Р., Брискин Г.С., Ильин А.В., Нечаев А.Н., Русаков С.С., Созинов В.И., Степаненко В.Г., Шелиманов В.А., Шенфельд А.Я./.- 1982.- 3 с.

50. А.с.967079. Способ получения сахаросодержащего продукта из свеклы. /Кремнев О.А., Боровский В.Р., Заец А.С., Лопатин В.В., Жукотский Э.К., Шелиманов В.А./.- 1982.- 8 с.

51. А.с.993694. Способ сушки нарезанной свеклы. /Кремнев О.А., Боровский В.Р., Заец А.С., Лопатин В.В., Шелиманов В.А., Жу-

котский Э.К., Маслогов Л.М., Майструк П.К.- 1982.- 10 с:

52. А.с.1002163. Способ получения стеклоармированного пресс-материала. /Боровский В.Р., Мишнаевский Л.М.-Г., Шелиманов В.А., Андрианов В.Г./.- 1982.- 4 с.

53. А.с.1088351. Способ получения пищевого красителя из растительного сырья.- /Кремнев О.А., Боровский В.Р., Мироненко Л.И., Демченко В.В., Шелиманов В.А., Мерзоян Г.С., Шляр И.Н./ - 1983.- 5 с.

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$d$  - влагосодержание воздуха;  $D$  - коэффициент диффузии;  $D_p = M D / RT$  - коэффициент диффузии, отнесенный к разности парциальных давлений;  $f$  - живое сечение капилляра;  $g$  - ускорение свободного падения;  $g_n$  - поток пара;  $H$  - максимальная высота капиллярного подъема жидкости;  $k$  - конусность капилляра;  $K$  - проницаемость пористого материала;  $K_p$  - коэффициент паропроницаемости полупроницаемой оболочки;  $K_f$  - коэффициент фильтрации;  $l$  - длина столбика жидкости, впитанной капилляром, расстояние от мениска жидкости до устья капилляра;  $m$  - темп пропитки;  $M$  и  $M_n$  - молекулярные массы парогазовой смеси и пара;  $N$  - скорость сушки;  $p$  - парциальное давление компонента смеси;  $p_n''$  - давление насыщенных паров жидкости;  $P$  - общее давление газовой смеси;  $\bar{P} = p/P$  - относительная величина парциального давления компонента в смеси;  $r$  - радиус капилляра;  $r_n$  - теплота испарения;  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $s$  - толщина оболочки;  $t$  - температура;  $T$  - абсолютная температура;  $V$  - объемный расход;  $x$  - продольная координата;  $y$  - поперечная координата;  $Z = l/H$  - относительная величина столбика впитанной жидкости;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи;  $\beta_p$  - коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности парциальных давлений;  $\delta$  - толщина граничного слоя жидкости;  $\eta$  и  $\eta_B$  - коэффициенты динамической вязкости жидкости и воздуха;  $\theta$  - угол смачивания;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $\mu_d$  - коэффициент диффузионного сопротивления дисперсной среды;  $\rho$  и  $\rho_B$  - плотность жидкости и парогазовой смеси;  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения;  $\tau$  - время;  $\varphi = p_n/p_n''$  - относительная влажность воздуха.

Индексом: в - воздух; п - пар;  $O, cr$  - начальные и средние значения;  $s$  - оболочка.

Числа подобия:  $Bi_q = \alpha s / \lambda_s$ ;  $Bi_m = \beta_p s / D_{p_s}$  - тепловое и массообменное числа Био для оболочки;  $Pr$  и  $Pr_m$  - тепловое и диффузионное числа Прандтля.

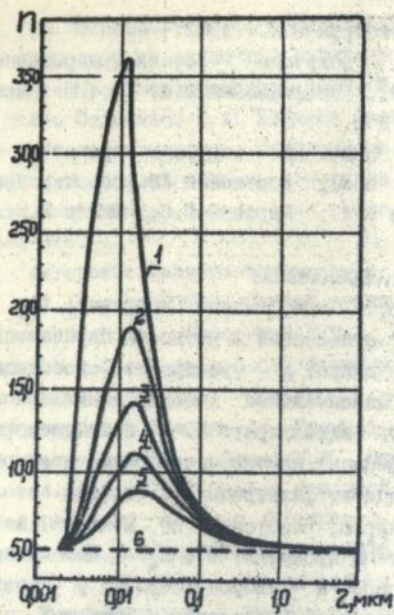


Рис. 1. Зависимость показателя степени в температурной зависимости скорости движения воды при скачкообразном изменении вязкости в граничном слое.

1 -  $\eta_a/\eta = 100$ ; 2 -  $\eta_a/\eta = 10$ ;  
 3 -  $\eta_a/\eta = 5,0$ ; 4 -  $\eta_a/\eta = 4,0$ ;  
 6 -  $\eta_a/\eta = 1,0$ .

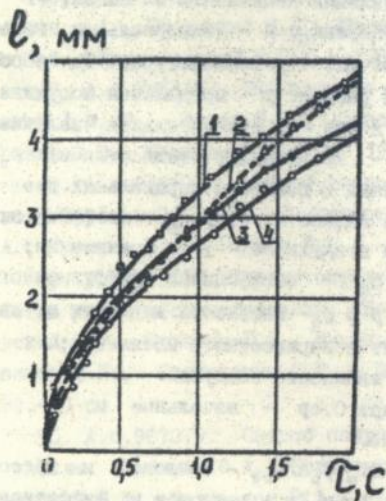


Рис. 2. Кинетика впитывания жидкости моделью капиллярной системы. 1, 4 - широкий и узкий изолированные капилляры; 2, 3 - узкий и широкий капилляры в сообщающейся системе.

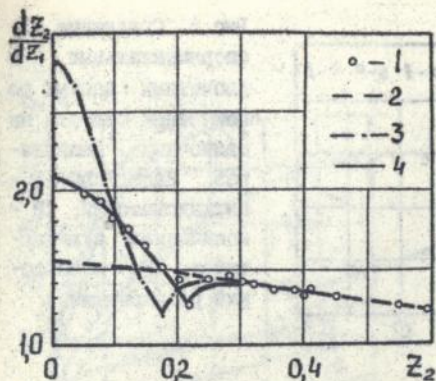


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных данных и расчетных зависимостей  $\frac{dz_2}{dz_1}$  от  $z_2$ .

1 - опытные данные; 2 - расчетная зависимость без учета сопротивления перегородки; 3 - то же, с учетом сопротивления перегородки; 4 - то же, с учетом явления гидродинамической стабилизации.

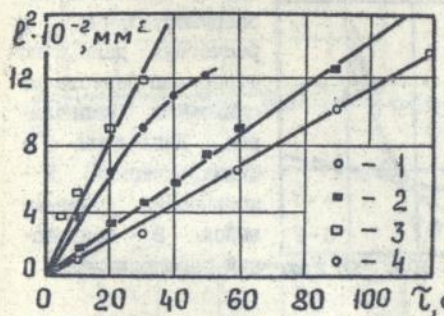


Рис. 4. Кинетика процесса капиллярной пропитки кварцевого песка с различным размером частиц ( $d_q$ ).

1 -  $d_q = 0,5 \text{мм}$ ; 2 -  $d_q = 0,25 \text{мм}$  - опыты с перегородкой; 3 -  $d_q = 0,5 \text{мм}$ ; 4 -  $d_q = 0,25 \text{мм}$  - опыты без перегородки.

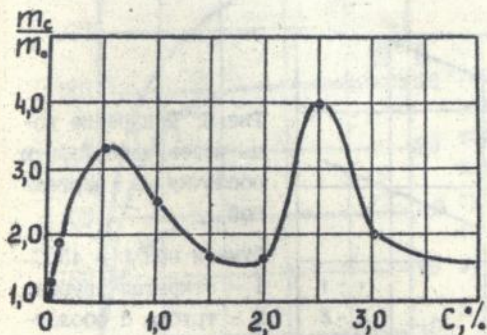


Рис. 5. Относительный темп пропитки искусственного волокна растворами бутилового спирта.

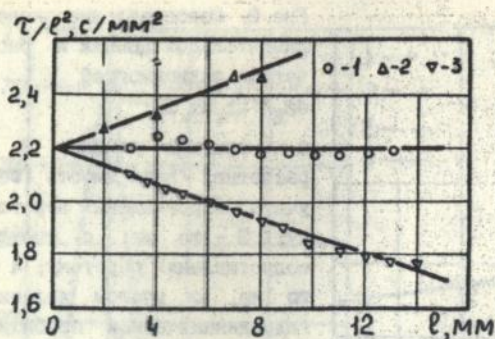


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по испарению бензола из одиночных капилляров. Капилляры: 1 - цилиндрический; 2 - конический суживающийся; 3 - конический расширяющийся.

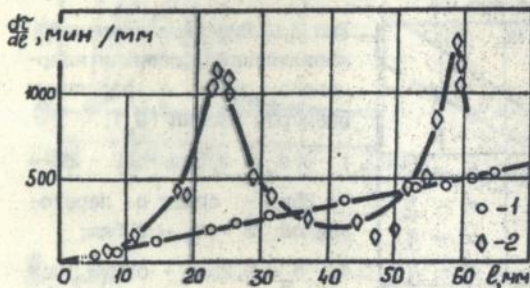


Рис. 7. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по испарению бензола из одиночных капилляров. Капилляры: 1 - цилиндрический; 2 - конический суживающийся; 3 - конический расширяющийся.

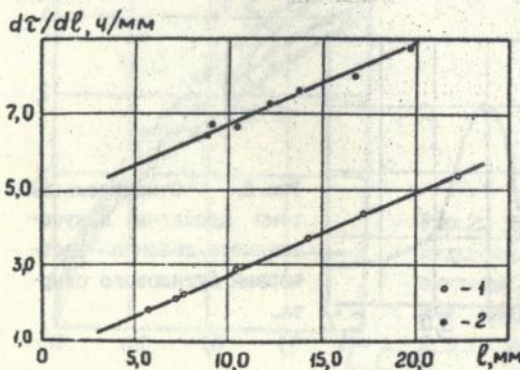


Рис. 8. Испарение воды через однослойную оболочку из чертежной бумаги при  $t = 45^\circ\text{C}$ . 1 - открытая трубка; 2 - трубка с оболочкой.

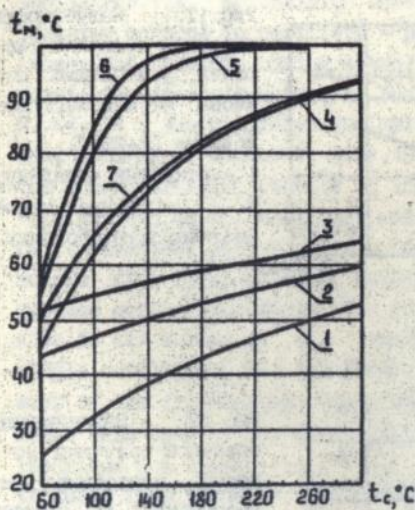


Рис. 9. Влияние параметров теплоносителя и свойств воздухопроницаемых оболочек на температуру материала (а) и приведенный потенциал сушки (в) в первом периоде ( $\Delta P / P = 0$ ).

1-3- $Bi_q=0$ ; 1- $P_{no} = 1,33 \times 10^3$  Па;  
 2- $P_{no} = 7,98 \times 10^3$  Па; 3- $P_{no} = 1,33 \times 10^4$  Па;  
 4-6- $P_{no} = 1,33 \times 10^3$  Па;  
 4- $Bi_q=0,1$ ;  $K_{об} = 100$ ; 5- $Bi_q = 1,0$ ;  $K_{об} = 100$ ; 6- $Bi_q=0,1$ ;  
 $K_{об} = 1000$ ; 7- $Bi_q=0,1$ ;  
 $K_{об} = 100$ ; 7- $P_{no} = 7,98 \times 10^3$  Па;

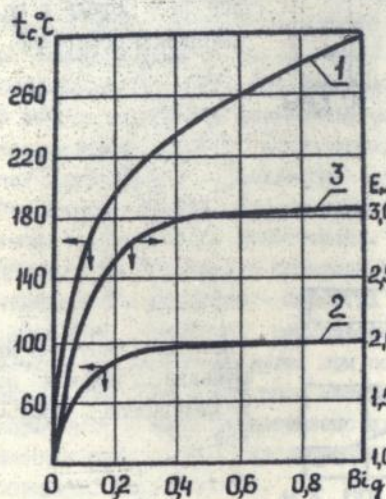


Рис. 10. Зависимость температуры теплоносителя и материала, а также степени интенсификации процесса сушки в зависимости от числа  $Bi_q$  при  $e_{кр} = 1,0$  ( $K_{об} = 100$ ;  $\Delta P / P = 0$ ) 1 -  $t_c$ ;  
 2 -  $t_w$ ; 3 -  $E_N$ .

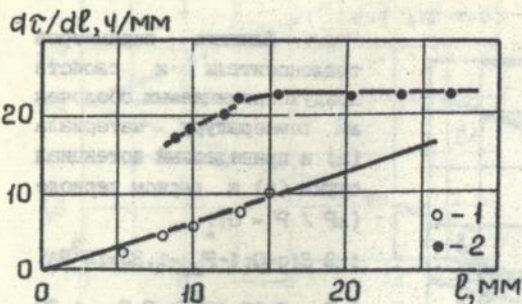


Рис. 11. Зависимость обратной величины скорости углубления мениска от его местоположения ( $t=26^\circ\text{C}$ ).  
1 - открытый капилляр;  
2 - испарение через целлофановую оболочку.

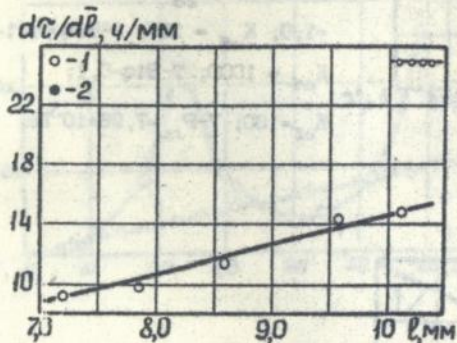


Рис. 12. Зависимость обратной величины скорости испарения от расстояния до уровня жидкости в коротком колене модели.  
1 - модель без оболочки;  
2 - модель с целлофановой оболочкой.

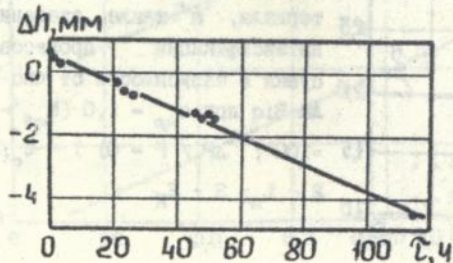


Рис. 13. Кинетика изменения давления под целлофановой оболочкой.

Shelimanov V.A. Scientific bases of internal heat and mass transfer control in capillary - porous bodies at development of energy and resources saving technologies.

Thesis for doctor's degree in technical sciences (specialization 01.04. 14 - thermophysics and molecular physics) Ukrainian National Academy of Sciences, Kiev, 1994.

The thesis contains results of theoretical and experimental investigations of internal heat and mass transfer rate dependence on temperature, porous bodies and capillary porous materials models' structural characteristics and additions of nonionogenic surface active substances. The role of semipermeable and permeable to air shells in the process of water evaporation from single capillaries and capillary- porous materials is shown. New ways of the transfer processes control in solid disperse materials were used in the development of high intensity drying technique and technological lines, which have eventually been introduced into industry. The thesis is based on 63 printed works and 12 certificates of authorship.

Шеліманов В.А. Научні основи управління внутрішнім тепломасопереносом в капілярно-пористих тілах при створенні енергоресурсозберігаючих технологій.

Дисертація на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 -теплофизика и молекулярная физика, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, 1994.

В работе содержатся результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния температуры, структурных характеристик моделей пористых тел и капиллярно - пористых материалов, а также добавок неионогенных поверхностно - активных веществ на интенсивность внутреннего массопереноса. Показана роль воздухо - и полупроницаемых оболочек в процессе испарения воды из одиночных капилляров и капиллярно - пористых материалов. Предложены способы управления процессами тепломассопереноса в твердых дисперсных материалах, использованные при создании конкретных высокоинтенсивных способов сушки ряда материалов и тепломассообменных технологических линий. Осуществлено их промышленное внедрение. По теме диссертации автором опубликовано 63 печатных работы, получено 12 авторских свидетельств.

Ключові слова:

керування, внутрішній тепломасоперенос, капілярно- пористі тіла, енергоресурсозберігання, технології.

155268

АВ 31.460

Подписано к печати 28.10.1994г. Формат 60x84/16  
Бумага офсетная Усл.-печ.лист, 20. Уч.-изд. лист 20.  
Тираж 100. Заказ 511.

---

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины,  
252057, Киев-57, проспект Победы, -56.