

ЛЕЗНОВ Владимир Сергеевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ
НЕЛИНЕЙНОГО ВЛАГОПЕРЕНОСА В ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ В
ПОЛЕ МАССОВЫХ СИЛ**

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Научный руководитель	Мизонов Вадим Евгеньевич доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты	Капанова Анна Борисовна доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный технический университет», профессор кафедры «Теоретическая механика» Смирнов Станислав Фёдорович доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный политехнический университет», профессор кафедры «Строительная механика»
Ведущая организация	ФГБУН «Институт химии растворов им. Г.А. Крестова» РАН, г. Иваново

Защита состоится _____ 2013 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.03 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета. Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет. Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01.
E-mail: uch_sovet@ispu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Шульпин Андрей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Широко распространенные в текстильной, химической, строительной и других отраслях промышленности процессы тепловлажностной обработки материалов продолжают оставаться одними из наиболее энергоемких составляющих их производства. В значительной степени они определяют и качество этих материалов или полуфабрикатов. Многообразие аппаратного оформления этих процессов, вытекающее как из условий конкретного производства, так и из технологических требований к их организации, приводит к тому, что специфика их протекания также весьма разнообразна. При обработке пористо-капиллярных материалов массовые силы, например, сила тяжести или центробежная сила, оказывают существенное влияние на кинетику процесса. Под их действием происходит перераспределение содержания влаги, смещение ее в сторону действия массовой силы. Образующиеся перекосы содержания влаги в процессе сушки могут оказать отрицательное влияние на качество готовых изделий, особенно если сушка проводится при повышенной температуре и в материале формируются градиенты температуры, приводящие к термическим напряжениям. Аналогичная ситуация возникает при обработке тканей в рулонах, когда желательное равномерное распределение химического реагента по рулону в течение длительного времени.

Из сказанного следует, что математическое моделирование влагопереноса в поле массовых сил представляет собой актуальную научную и технологическую задачу. Однако аналитические решения уравнений влагопроводности в пористо-капиллярном материале, на которых строятся математические модели, возможны только при весьма далеко идущих упрощениях, таких как предположение о линейности процесса и постоянстве массовой силы. Эти допущения часто входят в противоречие с важными реальными особенностями моделируемого процесса, что не позволяет адекватно прогнозировать его характеристики и выбирать рациональные режимы его реализации. Требуются другие подходы, так или иначе связанные с численной процедурой решения. Все отмеченное и определило цель настоящей работы, которая выполнялась в рамках ФЦП «Интеграция» (2.1 – А118 Математическое моделирование ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий) и международного договора о научном сотрудничестве между ИГЭУ и Ченстоховским политехническим университетом, Польша.

Цель работы – выявление закономерностей эволюции содержания влаги в пористо-капиллярных изделиях при действии массовой силы, разработка их математического описания и методов расчета и повышение на их основе эффективности соответствующих технологических процессов.

Задачи исследования

1. Разработать математическую модель эволюции содержания влаги в пористо-капиллярной среде при действии стационарных и нестационарных массовых сил с учетом возникающих нелинейных эффектов и программно-алгоритмическое обеспечение расчетов по этой модели.

2. Поставить и решить оптимизационные задачи влагопереноса при нестационарном

ционной массовой силе для конкретных технологических целевых функций.

3. Выполнить экспериментальную идентификацию параметров модели и ее верификацию в лабораторных и промышленных условиях.

Методы исследования. В работе выполнены теоретические и экспериментальные исследования. Математическая модель нелинейного влагопереноса построена на основе ячеечного представления процесса с использованием математического аппарата теории цепей Маркова. Идентификация параметров модели и ее экспериментальная проверка выполнена на специально разработанных лабораторных стендах методом измерения локальных содержаний влаги.

Соответствие паспорту специальности.

Материалы диссертации соответствуют научной специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по формуле паспорта специальности. Содержанием исследования является «применение математического моделирования, численных методов и комплексов программ для решения ... прикладных проблем» (формула специальности). Областью исследования являются: пункт 5 - Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента; пункт 7 - Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели. В работе присутствуют оригинальные результаты одновременно из трех областей: математического моделирования, численных методов и комплексов программ.

Научная новизна результатов работы:

1. Разработана ячеечная математическая модель для описания эволюции содержания влаги в пористо-капиллярном материале в поле постоянной массовой силы, включающая описание выхода капельной влаги через открытый край материала.

2. Разработанная модель обобщена на случай эволюции содержания влаги во вращающемся вокруг поперечной оси пористом стержне при переменной по радиусу и во времени массовой силе. Показано существование оптимальной скорости вращения, обеспечивающей минимальный перекоп содержания влаги.

3. Выполнены экспериментальные исследования эволюции содержания влаги в пористо-капиллярном материале с выходом капельной влаги через открытый край материала и на их основе проведена параметрическая идентификация и проверка математической модели.

4. Предложен новый подход к экспериментальному определению коэффициента влагопроводности, отличающийся конструктивной простотой используемого оборудования и меньшим временем обработки результатов измерений.

Достоверность основных научных положений и выводов работы подтверждается их сравнением с экспериментальными данными, а также опытом практического использования разработок в производственной и научной областях.

Обоснованность научных результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата, адекватного решаемым задачам.

Практическая ценность полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработан компьютерный метод инженерного расчета изменения локального влагосодержания и выхода капельной влаги в пористо-капиллярных длинномерных изделиях при существенном влиянии массовой силы и его программно-алгоритмическое обеспечение.

2. Разработано аппаратное оформление и методика экспериментального определения коэффициента влагопроводности в пористо-капиллярных телах.

Внедрение.

Разработанный метод расчета, его программно-алгоритмическое обеспечение и полученные на его основе рекомендации по совершенствованию процесса влажностной обработки тканей приняты к внедрению в ЗАО «Традиции текстиля», а также используются при выполнении научных исследований на кафедре котлов и термодинамики Ченстоховского политехнического университета, Польша.

Автор защищает:

1. Ячеичную математическую модель эволюции содержания влаги в пористо-капиллярном материале, включая ее капельный выход из материала, при наличии массовой силы (силы веса и/или центробежной силы).

2. Результаты экспериментальных исследований эволюции содержания влаги в пористо-капиллярном материале и подходы к независимому определению параметров разработанной модели.

3. Новый подход к экспериментальному определению коэффициента влагопроводности в пористо-капиллярных материалах.

4. Компьютерный метод расчета эволюции распределения содержания в пористо-капиллярном материале.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы были доложены, обсуждены и получили одобрение на следующих научных конференциях: Международных НТК «Современное состояние и перспективы развития электротехнологий - Бенардосовские чтения», Иваново, 2006, 2007, 2009, 13-ой МНТК студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, МЭИ, 2007, Международных конференциях «Математические методы в технике и технологиях ММТТ», Ярославль, 2007, Саратов, 2008, Псков, 2009, The 17th International Drying Symposium (IDS 2010), Magdeburg, Germany, 2010; представлены на IV выставке научных достижений Ивановской области «Инновации-2007», Иваново, 2007 (золотая медаль).

Публикации: по теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе, 5 статей в изданиях, предусмотренных перечнем ВАК, 1 монография и зарегистрирована программа для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, основных выводов, списка использованных источников (153 наименований) и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, охарактеризована научная новизна и практическая ценность полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе выполнен анализ современного состояния математического моделирования и расчета процессов влагопереноса в различных технологических вариантах его протекания. Практически все математические модели влагопереноса базируются на дифференциальных уравнениях, полученных А.В. Лыковым. Это уравнения в частных производных параболического типа (в общем случае – неоднородные, содержащие члены, описывающие источники влаги), для которых формулируется краевая задача с граничными условиями второго или третьего рода. Несмотря на их физическую ясность, получить их аналитические решения, пригодные для инженерных расчетов, можно только при весьма далеко идущих упрощениях, часто входящих в противоречие с важными реальными особенностями моделируемого процесса. Так, например, конвективная влагопроводность при постоянной массовой силе может быть описана аналитическим решением этого уравнения, получаемым при условии, если нет ограничений на локальное содержание влаги. Однако при сушке длинномерных изделий в вертикальном состоянии (например, стеновых панелей) полное заполнение пор материала в нижней части изделия составляет основную особенность процесса, от которой зависит его протекание. Уравнение становится нелинейным и не допускает аналитического решения. Ситуация еще более усложняется, если массовая сила неоднородна и не стационарна, что имеет место при совместном действии силы тяжести и центробежной силы инерции. Требуются другие подходы, так или иначе связанные с численной процедурой решения.

Одной из эффективных процедур, удобных для перехода к инженерным методам расчета, являются ячеечные модели, использующие математический аппарат теории цепей Маркова. Ячеечное представление процессов переноса применялось разными авторами довольно давно. Новая волна интереса к этому подходу возникла после выхода в свет монографии А. Тамира (А. Tamir), в которой было описано его обобщение применительно к моделированию химических реакторов. Впоследствии он был успешно использован А. Бертье (Н. Berthiaux) и В.Е. Мизоновым для моделирования механических процессов в дисперсных средах, а позже, совместно с С.В. Федосовым, Н.Н. Елиным и В.Ю. Волынским, для моделирования процессов термической обработки дисперсных материалов.

Особенностью ячеечной модели является запись уравнений баланса для конечного малого объема среды, что допускает прямую идентификацию параметров модели по локальным параметрам состояния процесса. Параметры состояния организуются в вектор состояния, а его эволюция описывается переходной матрицей (аналогом матрицы переходных вероятностей в теории цепей Маркова). Эта модель не связана ограничениями на линейность процесса, на постоянство коэффициентов переноса и другими ограничениями. Она легко ал-

горитмизируется и особенно удобна для расчетов в вычислительных средах, ориентированных на операции с матрицами, например, MATLAB. Ориентируясь на описанные выше преимущества ячеечных моделей, именно эта стратегия была выбрана в качестве основного математического инструмента для описания и расчета исследуемых процессов.

Анализ опубликованных результатов экспериментальных исследований показал, что систематических и всесторонних данных, относящихся к локальным распределениям содержания влаги в процессах влагопереноса, крайне мало, что практически исключает идентификацию и верификацию модели именно по локальным распределениям. Поэтому в задачи работы было включено и экспериментальное исследование эволюции распределения содержания влаги в процессе конвективного влагопереноса.

Во второй главе описано построение ячеечной математической модели процесса и приведены результаты численных экспериментов с ней. Объектом моделирования является одномерная конвективная диффузия влаги в длинномерном пористо-капиллярном образце (стержне). Ячеечная модель процесса показана на рис. 1.

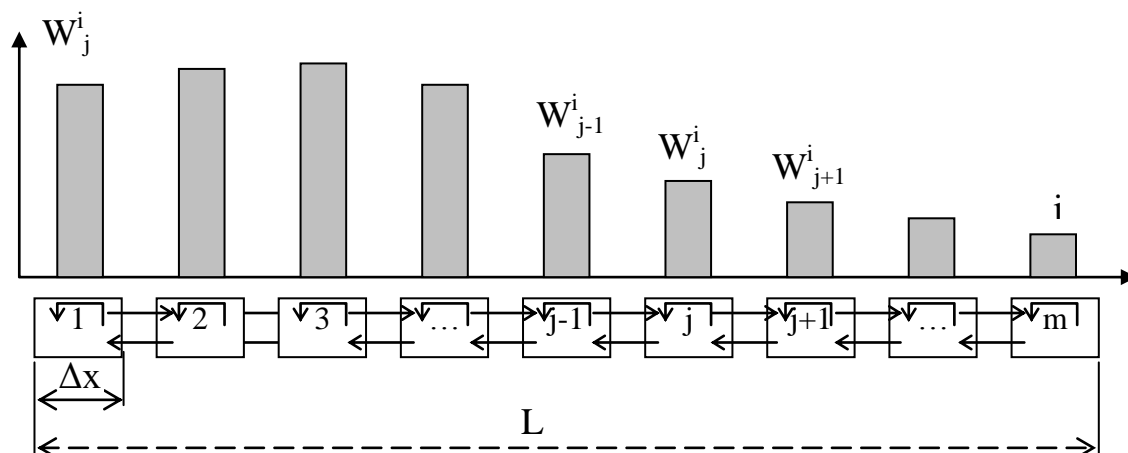


Рис. 1. Ячеечная модель массопроводности в одномерном объекте

Базовой моделью является изолированный по всем поверхностям стержень без ограничения содержания влаги в отдельных его частях. Стержень разбит на m ячеек идеального смешения длиной $\Delta x=L/m$. Текущее состояние процесса характеризуется вектором-столбцом содержания влаги в ячейках $W=\{W_j\}$, $j=1,2,\dots,m$. Эволюция состояния рассматривается через малые конечные промежутки времени Δt , в течение которых влага из данной ячейки может перейти только в соседние с ней ячейки. При этом текущее время процесса рассчитывается как $t_i=(i-1)\Delta t$, где $i=1,2,\dots$ - номер перехода, который может служить целочисленным аналогом времени. Два последовательные состояния W^i и W^{i+1} связаны рекуррентным матричным равенством

$$W^{i+1}=PW^i, \quad (1)$$

где P – переходная матрица, определяемая соотношением

$$P = \begin{bmatrix} 1-d-v & d & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ d+v & 1-2d-v & d & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d+v & 1-2d-v & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1-2d-v & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & d+v & 1-2d-v & d \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & d+v & 1-d \end{bmatrix}, \quad (2)$$

в которой $d=D\Delta t/\Delta x^2$ – доля переноса массы влаги из ячейки за один переход благодаря чисто диффузионному процессу, где D – коэффициент массопроводности, и $v=V\Delta t/\Delta x$ – доля конвективного переноса массы влаги благодаря действию массовой силы, где V – размерная скорость этого переноса.

Для изолированного стержня при $v=0$ модель (1), (2) дает асимптотически равномерное распределение влаги при любом начальном; при $v>0$ асимптотическое распределение смещено в сторону действия массовой силы, куда направлена v . Модель пока не имеет ограничений на содержание влаги в ячейках.

В реальных условиях при наличии массовой силы содержание влаги в отдельных ячейках (преимущественно в крайних) может достичь предельного, а из самой крайней ячейки влага может удаляться в капельном виде. Для учета этого предлагается на каждом переходе производить проверку и корректировку содержания влаги в крайних ячейках с той стороны стержня, в сторону которой действует массовая сила. Процедура корректировки показана на рис.2.

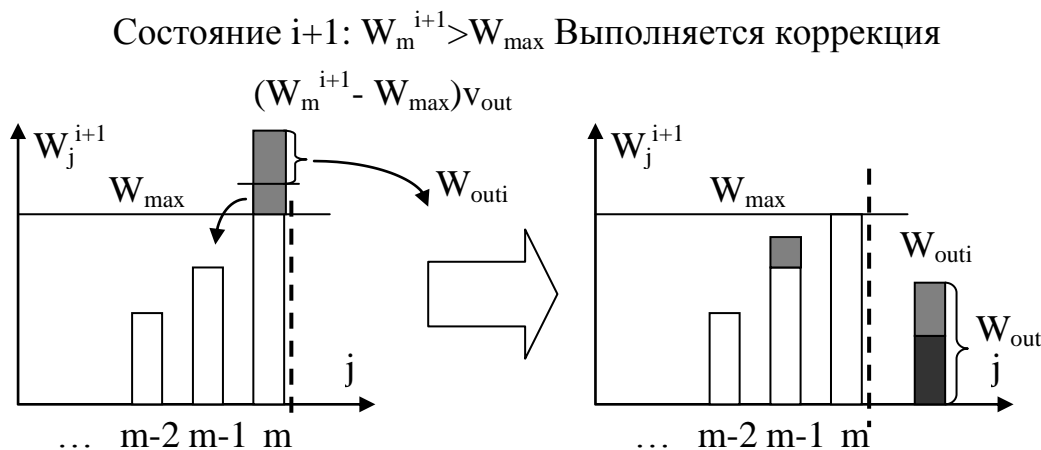


Рис. 2. Процедура коррекции вектора состояния (содержания влаги в ячейке) при превышении предельного содержания и удаления части влаги через край стержня

Пусть в каком-то из переходов матрица (2) направляет в крайнюю ячейку столько влаги, что ее содержание превышает предельное. Тогда считается, что часть избытка влаги выходит за пределы стержня в капельном состоянии ($W_{\text{out}i}$

$= (W_m^{i+1} - W_{\max})v_{\text{out}}$, где v_{out} – доля избыточной влаги, выводимой наружу за 1 переход), а оставшаяся избыточная влага переходит в предыдущую ячейку (если после этого обратного перехода в ней содержание влаги также превышает предельное, то влага переводится в следующую ячейку и т.д.). При $v_{\text{out}}=0$, модель будет описывать перераспределение влаги в изолированном стержне при ограничении содержания влаги в ячейках. Пример такого процесса показан на рис.3 (при $d=0$ влага из любого начального распределения переходит в предельное на краю стержня).

Описанная процедура эвакуации влаги предполагает, что предельная в нижней ячейке влага может удерживаться капиллярными силами неограниченно долго, что справедливо только при малом ускорении массовой силы (полное удаление влаги путем только влагопроводности оказывается невозможным). При его большом значении более адекватным будет предположение, что через открытый торец стержня удаляется доля v_{out} влаги независимо от ее содержания (здесь возможно полное удаление влаги из стержня). На рис.4 показано влияние скорости вывода влаги, превышающей предельное содержание, через край стержня. При $v_{\text{out}}=0$ масса влаги в стержне сохраняется, при $v_{\text{out}}>0$ – убывает.

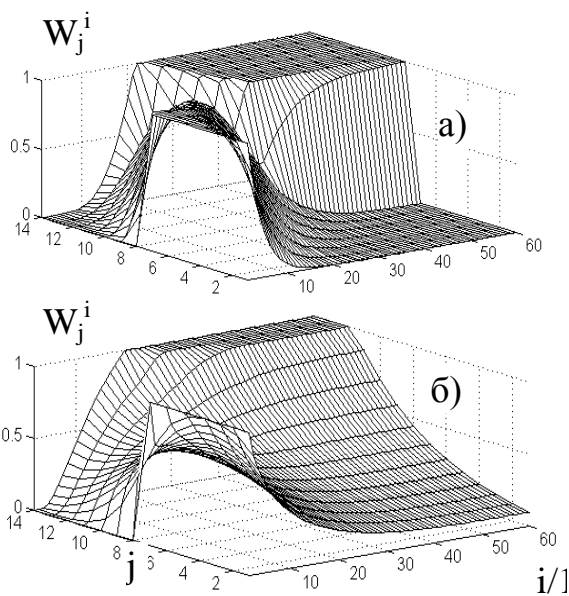


Рис. 3. Кинетика изменения распределения влаги по стержню $d=0$ (а) и $d=0,12$ (б) ($v=0,03$; $W_{\max}=1$)

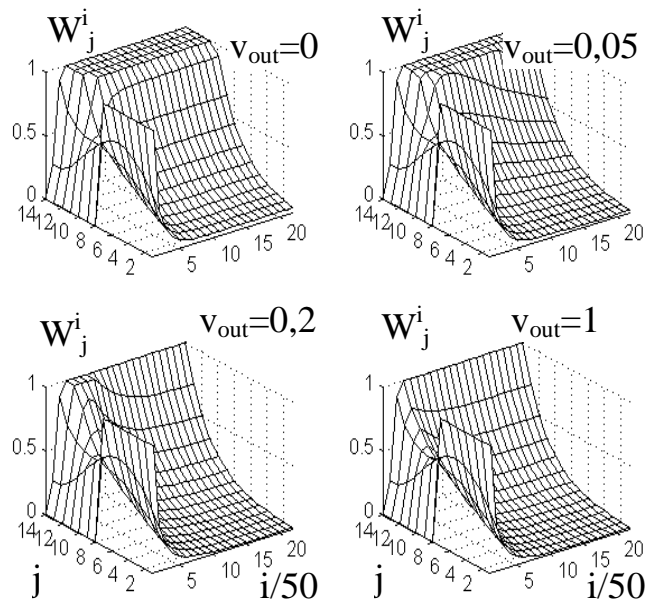


Рис. 4. Влияние скорости эвакуации влаги на кинетику процесса ($d=0,12$; $v=0,05$)

В диссертации приведена модель процесса, когда влага может удаляться и с боковой поверхности стержня за счет его сушки.

Задача заметно усложняется, если массовая сила становится неравномерной и нестационарной, как это имеет место при вращении стержня вокруг поперечной оси (рис.5).

В этом случае влага в ячейке находится под действием комбинации силы тяжести, проекция которой на направление стержня зависит от его углового по-

ложения, и центробежной силы, которая всегда направлена по стержню, но зависит от среднего радиуса ячейки

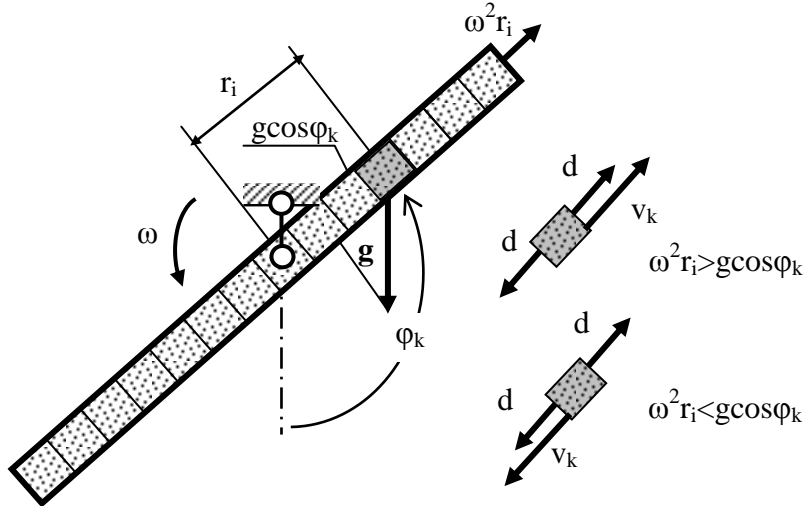


Рис. 5. Расчетная схема ячейечной модели влагопереноса во вращающемся вокруг поперечной оси стержне

$$v_j^i = \beta (g \cos \varphi^i + \omega^2 r_i) \Delta t / \Delta x, \quad (3)$$

где коэффициент β связывает плотность массовой силы и скорость движения влаги под ее воздействием, ω – угловая скорость вращения стержня, $\varphi^i = \omega(i-1)\Delta t$ – его угловое положение, причем величина v_j^i может быть как положительной, так и отрицательной.

Переходная матрица (2) в этом случае приобретает вид

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 - d - v_1^i & d + (1 - e_2^i) |v_2^i| & 0 & 0 & \dots \\ d + e_1^i v_1^i & 1 - 2d - v_2^i & d + (1 - e_3^i) |v_3^i| & 0 & \dots \\ 0 & d + e_2^i v_2^i & 1 - 2d - v_3^i & d + (1 - e_4^i) |v_4^i| & \dots \\ 0 & 0 & d + e_3^i v_3^i & 1 - 2d - v_4^i & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $e_j^i = 1$, если $v_j^i > 0$, и $e_j^i = 0$, если $v_j^i < 0$.

Здесь она уже зависит от номера временного перехода через ее элементы, включающие доли конвективного переноса.

Описание выхода капельной влаги через края стержня, если они открыты, полностью аналогично приведенному выше.

На рис. 6 показан пример расчета эволюции содержания влаги в закрытом стержне при различных скоростях вращения.

Локальная неравномерность распределения содержания влаги оценивалась величиной $\varepsilon(i) = (W_{\max}^i - W_{\min}^i) / W_0$, которая пульсирует при вращении, а средняя по времени неравномерность $\langle \varepsilon \rangle$ – как среднее значение ε за несколько последних периодов. Максимальная неравномерность влаги имеет место при отсутствии вращения. С ростом угловой скорости она проходит через минимум, а затем снова возрастает. Этот вывод имеет важное значение при отбеливании тка-

ней в рулонах, когда желательно иметь максимально возможное равномерное распределение реагента.

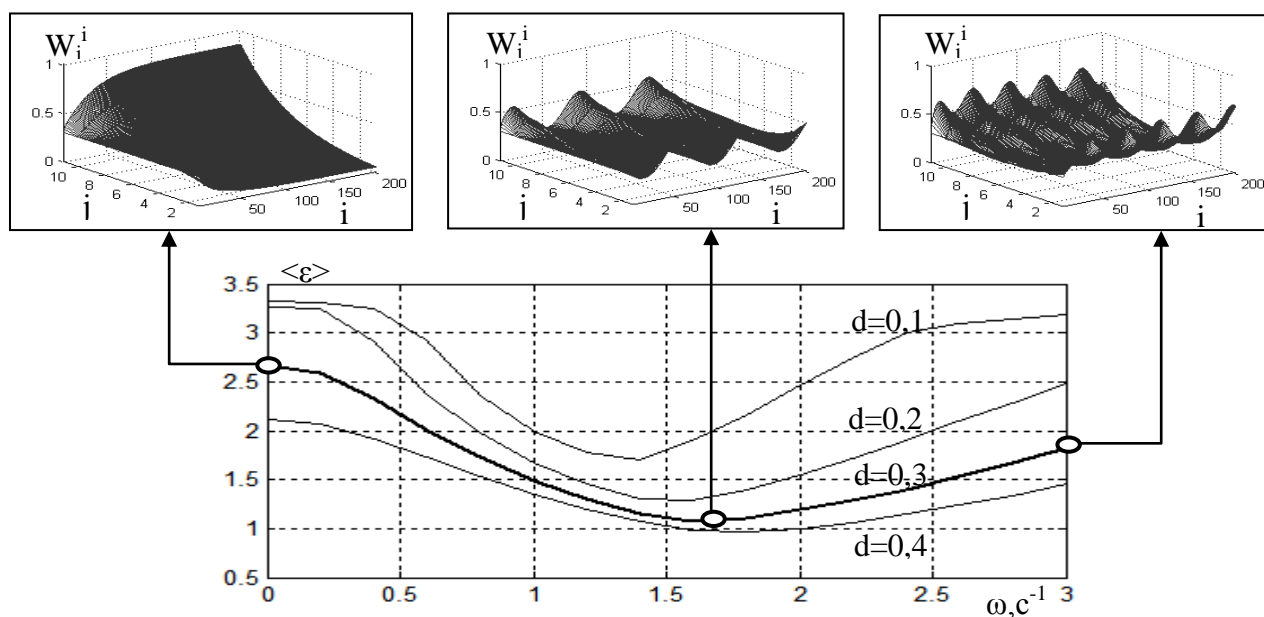


Рис. 6. Влияние угловой скорости вращения на распределение содержания влаги (вверху) и на среднюю неравномерность ее распределения (внизу)

При открытых краях стержня происходит механическое удаление влаги. На рис. 7 показан пример расчетного исследования этого процесса. Интересно, что при $\omega = 1,6$ кинетика удаления влаги практически совпадает с таковой для неподвижного стержня, поскольку при этой скорости минимальное количество влаги смещается к краям стержня (рис. 6). Далее скорость удаления влаги возрастает, влияние силы тяжести убывает, и процесс переходит в чистое центрифугирование.

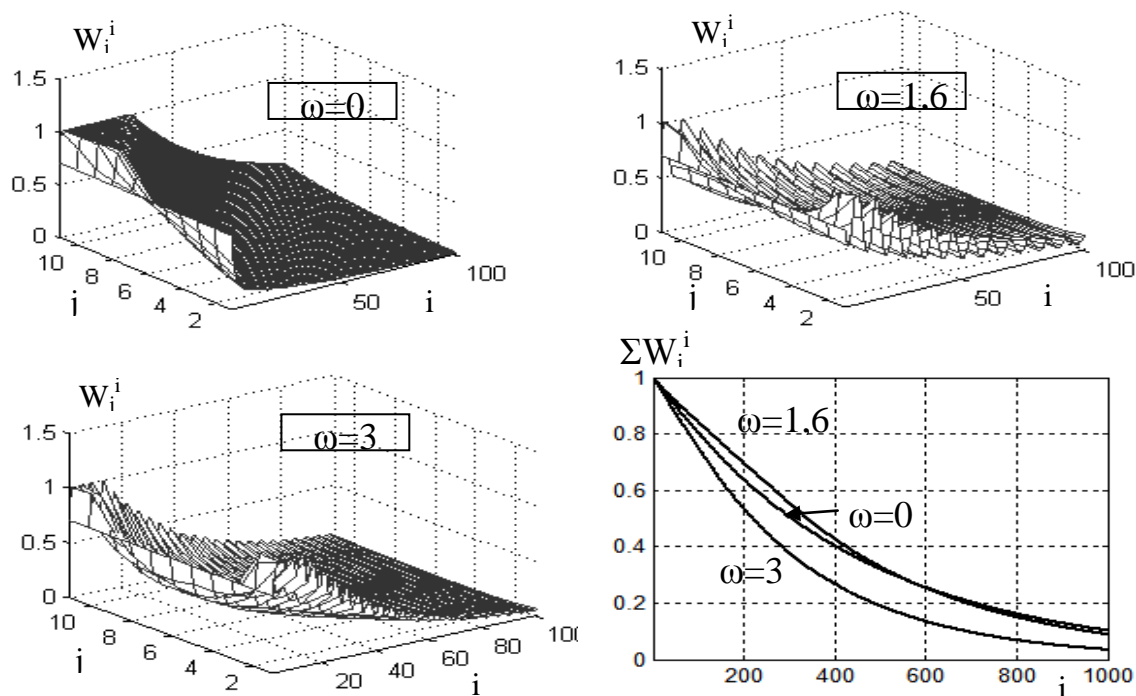


Рис. 7. Эволюция содержания влаги в стержне с открытыми краями и кинетика удаления влаги при различных угловых скоростях вращения

Таким образом, предложенная модель позволяет качественно учитывать все особенности исследуемого процесса, а получаемые на ее основе расчетные распределения имеют ясную физическую интерпретацию. Для проверки ее количественной адекватности и идентификации параметров модели d , v и v_{out} необходимы экспериментальные исследования, описанные в следующей главе.

В третьей главе приведено описание процедуры экспериментальных исследований и их результаты. Эксперименты были ориентированы на получение данных по *локальным распределениям* содержания влаги и исследуемом одномерном образце, то есть на прямую проверку полученных выше распределений.

Экспериментальная установка состояла из электронных весов АСОМ JW-1, позволяющих производить взвешивание с точностью 0,01 г., каркаса подвеса образцов и кюветы для сбора влаги. В качестве модельного материала использовалась бытовая губчатая салфетка, производящаяся из вискозного волокна фирмой Spontex SNK, Венгрия. Исходные размеры салфетки – 180x140x5 мм. У каждого пакета салфеток контролировалась их плотность, которая достаточно плотно группировалась около значения 0,1 г/см³. Намоченный погружением в воду материал имел плотность 0,86...0,88 г/см³, то есть каждый кубический сантиметр удерживал в среднем 0,77 г воды, что являлось предельным содержанием влаги в 1 см³ материала.

Образец при подготовке размечался на 14 одинаковых ячеек, именно под это число ячеек была составлена описывающая процесс модель. Семь образцов

с одинаковым начальным распределением влаги (заполнен до предельного содержания на всю длину или на ее половину) помещались в одинаковые условия, совокупность и задачи которых показаны на рис. 8.

Моменты времени для контроля распределения содержания влаги были следующими: $t_{мин} = [0, 3, 8, 20, 55, 148, 403, 1097]$. В соответствующий момент времени очередной образец разрезался на полоски (ячейки) и в каждой ячейке путем взвешивания определялось содержание влаги. В итоге получалась кинетика изменения локального содержания влаги в стержне в соответствующих условиях. В опытах, где предполагался выход капельной влаги через нижний торец, под ним размещалась на весах кювета и определялась кинетика этого процесса. В опытах с изоляцией всех

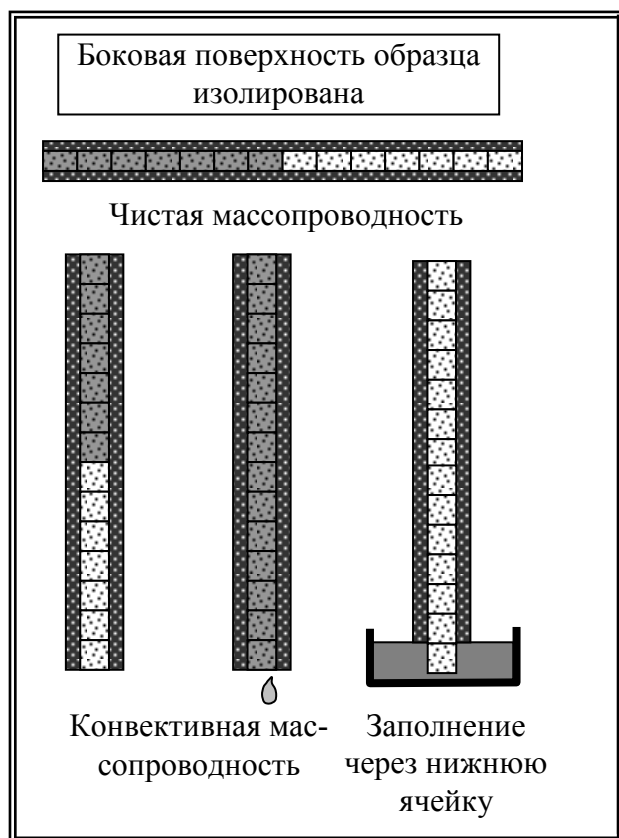


Рис. 8. Варианты выполненных экспериментальных исследований

или отдельных частей образца использовалась прозрачная фольга, в которой делались проколы, чтобы избежать нежелательно перераспределения давления.

На рис. 9 показаны результаты исследования кинетики в горизонтальном изолированном образце, где перераспределение начальной влаги можно отнести на счет чистой влагопроводности. Здесь же показаны условные обозначения, относящиеся к времени, прошедшему с начала опыта, которые используются на всех последующих графиках. Линии представляют расчетные распределения, рассчитанные по описанной выше ячеечной модели для условий опыта. Параметр модели d подбирался методом наименьших квадратов для всей совокупности опытных данных. То, что один параметр позволяет удовлетворительно описывать опытные распределения при всех значениях времени, свидетельствует о том, что реальный процесс и модель соответствуют друг другу, а полученное значение d можно использовать в других условиях, когда чистая влагопроводность является уже только одной из составляющих процесса.

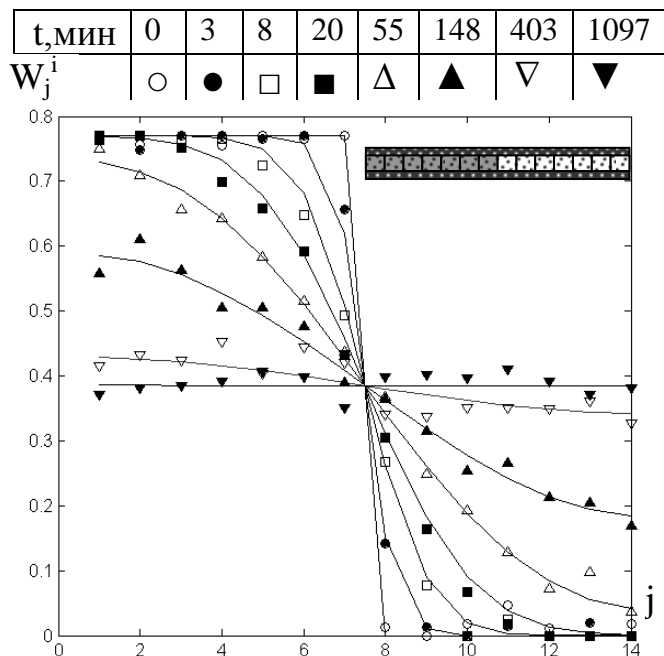


Рис. 9. Изменение распределения содержания влаги в горизонтальном изолированном образце (точки – эксперимент, линии – расчет при $d = 0,12$, $\Delta t = 1$ мин)

Определение d по локальным содержаниям влаги является наиболее точным, но в то же время трудоемким и продолжительным процессом. Предложен и апробирован новый подход к определению коэффициента влагопроводности, не связанный с разрезанием образца. Его схема и результаты исследования показана на рис. 10. Изолированный образец, наполовину наполненный влагой, размещен на тонкой пластинке, один край которой В шарнирно закреплен, а другой край А опирается на весы, измеряющие реакцию опоры А. По мере диффузии влаги вправо центр ее тяжести также смещается вправо, а величина реакции в опоре А уменьшается, что регистрируется весами. Изменение реакции однозначно связано с процессом влагопроводности влаги, полностью определяемым коэффициентом d (соответствующие расчетные формулы приведены в диссертации). Имея опытную зависимость $R_A(t)$ и накладывая ее на семейство расчетных зависимостей для разных d , можно подобрать d , обеспечивающее их совпадение. Справа, на рис. 10 показаны результаты опытного определения значения d , которое с хорошей точностью совпало со значением, определенным по локальным содержаниям влаги.

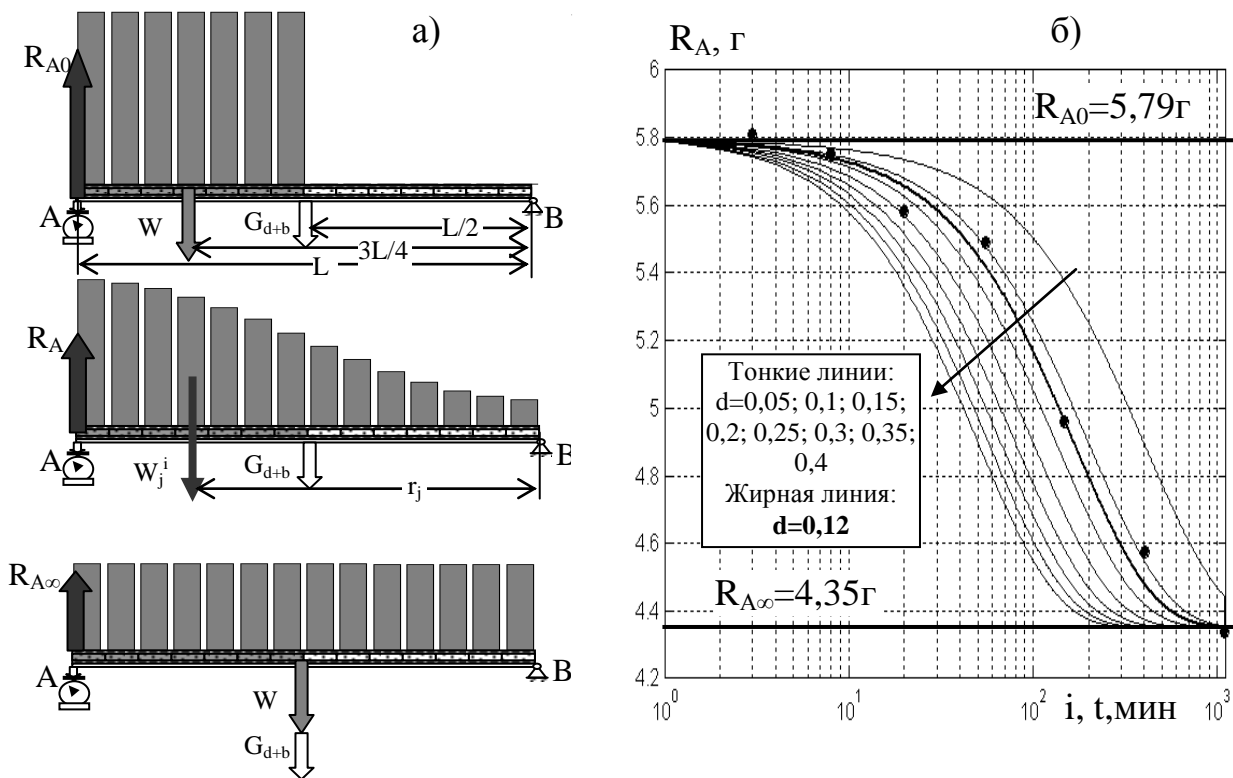


Рис. 10. К способу определения коэффициента массопроводности (а) и результаты его экспериментального определения (б)

Для определения параметра ν в модели использовалась схема с погруженной в жидкость нижней ячейкой вертикального изолированного по бокам образца, содержание влаги в которой считалось постоянным и равным предельному

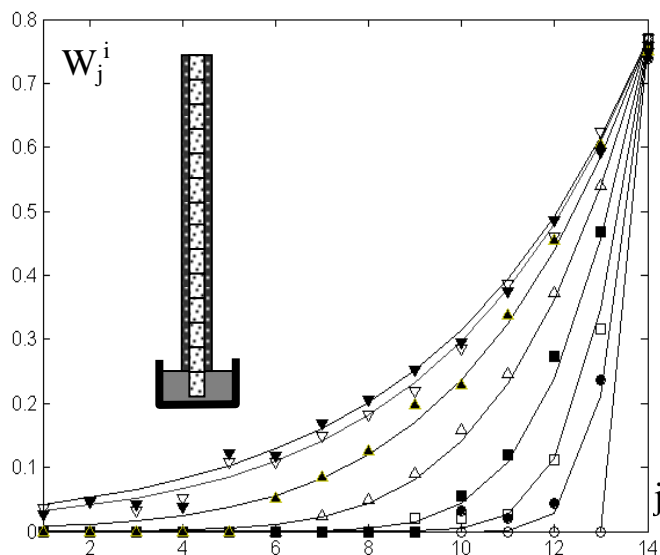


Рис. 11. Кинетика заполнения вертикального образца влагой через погруженную ячейку (точки – эксперимент, линии – расчет при $d=0,12$, $\nu=0,03$, $\Delta t=1$ мин)

(рис. 11). Кинетика набора влаги образцом зависит от массопроводности, параметр которой уже найден, и от направленной вниз силы веса, определяющей величину ν , которая также подбиралась методом наименьших квадратов. Сравнение опытных и расчетных распределений содержания влаги при одном подобранном параметре ν в существенно разные моменты времени свидетельствует, что перераспределение влаги в стержне есть именно процесс линейной конвективной диффузии.

На рис. 12 показаны результаты экспериментального исследования процесса с выходом капельной влаги через нижний край образца при двух различных начальных распределениях содержания влаги. В опытах было установлено, что при открытом нижнем крае предельное содержание влаги с точностью производимых измерений не поднималось выше последней ячейки, то есть вся попавшая в последнюю ячейку избыточная над предельной влага выводилась через нижний край. Это позволило положить $v_{out}=1$ и исключить ее из параметров идентификации, по крайней мере, для исследуемого материала

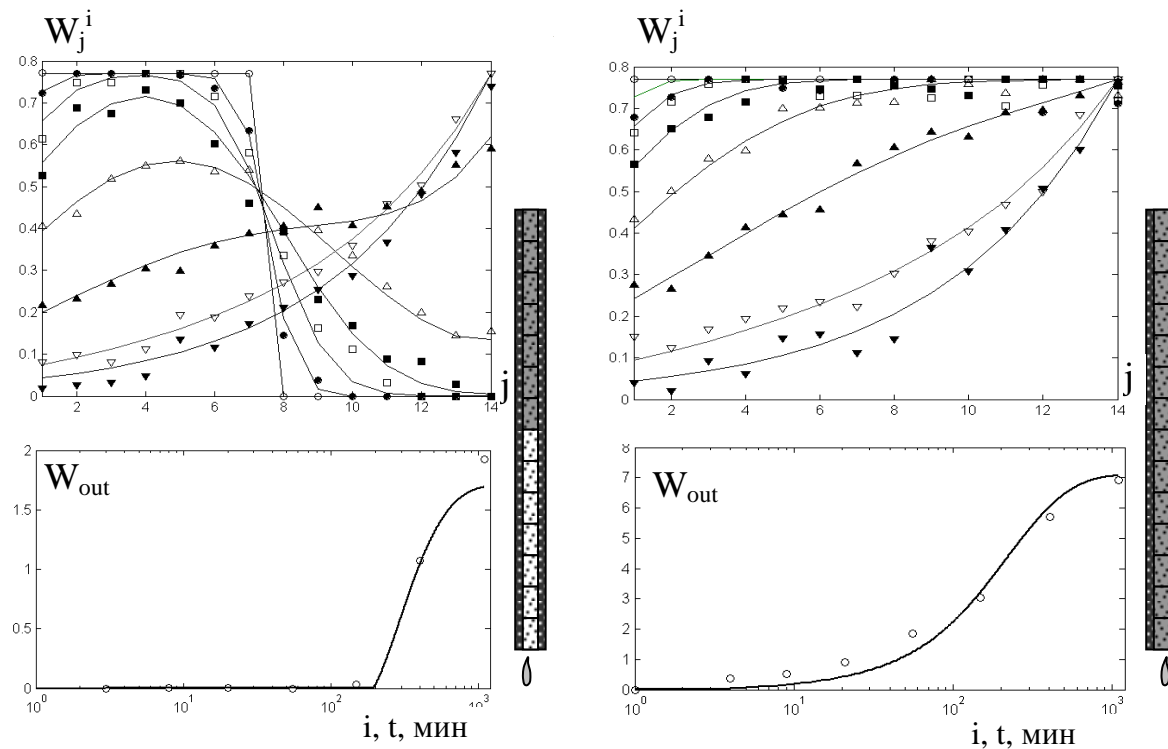


Рис. 12. Кинетика изменения содержания влаги при вертикальном положении изолированного по бокам образца и полного выхода влаги через нижний край при различном начальном распределении влаги (точки – эксперимент, линии – расчет при $d = 0,12$, $v = 0,03$, $\Delta t = 1$ мин)

В диссертации модель удаления влаги через торцы стержня дополнена обычными уравнениями его сушки с боковой поверхности, также описанными в рамках ячеечной схемы, что, в конечном счете, позволяет описывать кинетику сушки длинномерных пористых изделий в поле массовой силы.

Таким образом, предложенная модель и подтверждающие ее экспериментальные данные позволяют полностью описать и рассчитать процесс влагопроводности в пористо-капиллярных материалах в поле массовой силы. Предложенные подходы к экспериментальному определению параметров переноса достаточно просты, чтобы использовать их для конкретных материалов в условиях заводской лаборатории.

В четвертой главе описаны способы и результаты практического использования разработанных в диссертации подходов к моделированию массопереноса в поле массовой силы. Детализирована последовательность расчета и структура его программно-алгоритмического обеспечения. Предложена и апро-

бирована методика экспериментального определения параметра V конвективной влагопроводности.

Результаты исследования были внедрены в ЗАО «Традиции текстиля» для анализа и совершенствования процесса пропитки тканей в рулонах, где необходимо поддержание достаточно равномерного содержания жидкого реагента по объему рулона в течение длительного времени. Расчеты показали, что оптимальна скорость вращения составляет 28 об/мин вместо использовавшихся 40 об/мин. Переход на оптимальную скорость обеспечил снижение перекоса содержания реагента на 20% и сокращение времени обработки на 10% без снижения качества ткани, что дало расчетный экономический эффект 430 тыс. руб/год.

Разработанная модель и программа расчета используются при выполнении научных исследований на кафедре котлов и термодинамики Ченстоховского политехнического университета, Польша.

Документы, подтверждающие промышленное использование метода расчета и внедрение выработанных рекомендаций приведены в Приложении.

Основные результаты диссертации

1. Разработана ячеечная математическая модель для описания эволюции содержания влаги в пористо-капиллярном материале в поле постоянной массовой силы, включающая описание выхода капельной влаги через открытый край материала.

2. Разработанная модель обобщена на случай эволюции содержания влаги во вращающемся вокруг поперечной оси пористом стержне при переменной по радиусу и во времени массовой силе. Показано существование оптимальной скорости вращения, обеспечивающей минимальный перекоп содержания влаги.

3. Выполнены экспериментальные исследования эволюции содержания влаги в пористо-капиллярном материале с выходом капельной влаги через открытый край материала и на их основе проведена параметрическая идентификация и проверка математической модели.

4. Предложен новый подход к экспериментальному определению коэффициента влагопроводности, отличающийся конструктивной простотой используемого оборудования и меньшим временем обработки результатов измерений.

5. Разработан компьютерный метод инженерного расчета изменения локального влагосодержания и выхода капельной влаги в пористо-капиллярных изделиях при существенном влиянии массовой силы и его программно-алгоритмическое обеспечение.

6. Разработанный метод расчета, его программно-алгоритмическое обеспечение и полученные на его основе рекомендации по совершенствованию процесса влажностной обработки тканей внедрены в ЗАО «Традиции текстиля» с экономическим эффектом 430 тыс.руб/год, а также используются при выполнении научных исследований на кафедре котлов и термодинамики Ченстоховского политехнического университета, Польша.

Основные публикации по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Новинский, И.В. Перенос влаги в пористом стержне в поле массовых сил / И.В. Новинский, В.Е. Мизонов, В.А. Зайцев, С.В. Федосов, В.С. Лезнов // Известия вузов. «Химия и химическая технология». – 2007. – Т. 50, №2. – С. 73–74.
2. Болотов, И.А. Моделирование влагопереноса во вращающемся вокруг поперечной оси стержне / И.А. Болотов, Е.А. Баранцева, В.С. Лезнов // Вестник ИГЭУ. – 2008. – №3. – С. 47–48.
3. Мизонов, В.Е. Моделирование тепловых процессов в секционированном биореакторе / В.Е. Мизонов, И.М. Першин, Н.Н. Елин, В.Х. Афанасов, В.С. Лезнов // Вестник ИГЭУ. – 2009. – №3. – С. 23–25.
4. Болотов, И.А. Распределение влаги во вращающемся вокруг поперечной горизонтальной оси пористом стержне / И.А. Болотов, В.Е. Мизонов, В.А. Зайцев, В.С. Лезнов // Изв. Вузов. «Химия и химическая технология». – 2010. – Т. 53. №5. – С. 100–102.
5. Mizonov, V. Modeling the Moisture Content Distribution over a Rotating Porous Cylinder using Markov Chains / V. Mizonov, V. Zaitsev, V. Volynskii, V. Leznov // Chemical Engineering & Technology. – 2011. – 34: 1185–1190. doi: 10.1002/ceat.201100015 Online ISSN: 1521-4125

В монографии

1. Новинский, И.В. Кинетика сушки материалов в поле массовой силы: Монография / И.В. Новинский, В.Е. Мизонов, В.А. Зайцев, В.С. Лезнов; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2007.–60 с. ISBN 5-9616-0232-х.

Публикации в других изданиях

1. Свид. о государств. регистр. программы для ЭВМ 2013610447. Расчет эволюции содержания влаги во вращающихся пористых телах [Текст] / Мизонов В.Е., Лезнов В.С.; правооблад. ГОУВПО Ивановский государственный энергетический университет; зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 09.01.13.
2. Мизонов, В.Е. Применение теории цепей Маркова к решению задач массопереноса в поле массовых сил / В.Е. Мизонов, И.В. Новинский, В.С. Лезнов // Материалы Международной НТК «13-е Бенардосовские чтения». – Иваново, 2006.–49 с.
3. Тихонов, О.В. Кинетика плавления стержня при действии перемещающегося локального источника теплоты / О.В. Тихонов, В.С. Лезнов, В.Е. Мизонов // Тезисы 13-ой МНТК студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва, МЭИ, 2007. – Т. 2. – С. 462 – 463.
4. Лезнов, В.С. Кинетика сушки пористых материалов в поле силы тяжести. / В.С. Лезнов, И.В. Новинский, В.Е. Мизонов // Тезисы 13-ой МНТК студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва, МЭИ, 2007. – Т. 2. – С. 455 – 456.

5. Лезнов, В.С. Расчетно-экспериментальное исследование сушки пористого материала в поле силы тяжести / В.С. Лезнов, В.Е. Мизонов, И.В. Новинский // Тезисы 14-ой МНТК «Состояние и перспективы развития энерготехнологии – 14-ые Бенардосовские чтения». – Иваново, 2007. – С. 175.
 6. Лезнов, В.С. Расчетно-экспериментальное исследование влагопереноса в пористых материалах в поле массовых сил / В.С. Лезнов, И.В. Новинский, В.Е. Мизонов // Сборник трудов 20-й международной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-20». – Ярославль, 2007. – Т. 5. – С.125–126.
 7. Мизонов, В.Е. Оптимизация механических и тепломассообменных процессов в химической и строительной промышленности / В.Е. Мизонов, Е.А. Баранцева, Ю.В. Хохлова, В.С. Лезнов // Каталог экспонатов IV выставки научных достижений Ивановской области «Инновации-2007». – Иваново, 2007. – С. 106.
 8. Мизонов, В.Е. Математическая модель теплового процесса в регенераторе с насадкой, допускающей фазовые переходы / В.Е. Мизонов, А.О. Курчев, Н.Н. Елин, В.С. Лезнов // Труды XXI МНК «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ21». – Саратов, 2008. – Т. 5. – С.118–119.
 9. Лезнов, В.С. Об одном подходе к определению коэффициента массопроводности в пористых телах / В.С. Лезнов, В.Е. Мизонов, Е.А. Баранцева // Труды XXI МНК «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ21». – Саратов, 2008. – Т. 5. – С. 69–70.
 10. Болотов, И.А. Моделирование переноса влаги во вращающемся цилиндре / И.А. Болотов, В.Е. Мизонов, В.С. Лезнов // Труды XXII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-22». – Псков, 2009. – Т. 9. – С.100–101.
 11. Афанасов, В.Х. Двухмерная ячеечная модель температурного режима в секциях секционированного биореактора / В.Х. Афанасов, В.Е. Мизонов, Н.Н. Елин, В.С. Лезнов // Тезисы 15-ой МНТК «Состояние и перспективы развития энерготехнологии – 15-ые Бенардосовские чтения». – Иваново, 2009.
 12. Mizonov, V. Application of the theory of Markov chains to model the moisture content distribution over a rotating porous cylinder / V. Mizonov, V. Zaitsev, V. Volynskii, V. Leznov // Proc. of The17th International Drying Symposium (IDS 2010). – Magdeburg, Germany, 3-6 October 2010. CD edition. Paper D5-2. -6p. ISBN 978-3-86912-036-2
-

ЛЕЗНОВ Владимир Сергеевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ
НЕЛИНЕЙНОГО ВЛАГОПЕРЕНОСА В ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ В
ПОЛЕ МАССОВЫХ СИЛ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____.2013. Формат 60x84 1/16.
Печать плоская. Усл. печ. л. _____. Тираж 100 экз. Заказ № _____.
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»
153003 г.Иваново, Рабфаковская, 34.
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ