

На правах рукописи

ЯНЮК Юлия Вячеславовна



**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СУШКИ
СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В СУШИЛЬНОЙ
УСТАНОВКЕ БАРАБАННОГО ТИПА**

Специальность 05.13.18 - Математическое моделирование численные
методы и комплексы программ.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Петрозаводск 2004

Работа выполнена на кафедре технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета Петрозаводского государственного университета.

Научный руководитель:

Доктор технических наук,
профессор Питухин А.В.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук,
профессор. Савин И. К.

Кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Борисов Г. А.

Ведущая организация:

ЗАО «ПетрозаводскМАШ»

Защита диссертации состоится 27 февраля 2004 года в 15 часов на заседании специализированного совета Д 212.190.03 при Петрозаводском государственном университете (185034. г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33, ПетрГУ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Петрозаводского государственного университета

Автореферат разослан «26» января 2004 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н., доцент



Поляков В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка эффективных методов управления техническими системами - это одна из наиболее важных проблем науки и производства. Существующий в настоящее время уровень моделей и алгоритмов не достаточен для создания современных систем автоматического управления непрерывными процессами. Реализация возможностей компьютерных технологий позволяет поднять на качественно новую ступень управление производственными процессами. Кроме того, в настоящее время остро стоит вопрос об экономии энергоресурсов при эксплуатации промышленных установок. Проектирование современных систем управления сложными техническими объектами основано прежде всего на использовании таких алгоритмов управления, которые позволяют минимизировать затраты сырья и энергии на производстве. Именно поэтому большое внимание на сегодняшний день уделяется созданию эффективных алгоритмов управления, которые отвечают требованиям, предъявляемым к системам автоматического управления.

Актуальность тематики обусловлена тем, что совершенствование большинства производственных процессов сдерживается в первую очередь отсутствием методов их адекватного моделирования, пригодных для использования в системах оптимизации и управления. Традиционные модели либо сложны для решения и неудобны в управлении, либо упрощены и решаемы, но при этом не полно описывают действительные процессы. Для решения проблемы управления в реальном времени, необходимо стремиться к получению таких математических моделей технических объектов, которые при возможности получения для них аналитического решения, были бы адекватны реальным процессам. Преимуществом базирующихся на аналитических зависимостях алгоритмов управления является высокая скорость выработки управляющих воздействий в условиях управления в режиме реального времени по сравнению с алгоритмами, созданными на основе численных решений, которые используются в большинстве систем управления.

Одной из важных проблем современного производства является управление технологическим процессом сушки. Сушка - это комплексный процесс и его динамику достаточно сложно описать математической моделью, которая была бы наиболее полной и при этом не слишком сложной для решения. Поиск такой модели необходим, прежде всего, для качественного управления.

Кроме того, актуальной является и задача оптимизации управления процессом сушки. Оптимизация управления может быть проведена по различным критериям. Выбор того или иного критерия зависит от конкретных условий проведения производственного процесса. Однако одним из основных факторов для оптимизации является энерго- и ресурсосбережение. Таким образом, эффективный алгоритм управления технологическим процессом сушки должен обладать с одной стороны высоким быстродействием, а с другой - быть оптимальным с точки зрения снижения энергетических затрат и потребления ресурсов.

Цель работы - снижение энергозатрат на технологический процесс сушки путем математического моделирования и оптимизации алгоритма управления сушильной установкой барабанного типа.

Научная новизна.

1. Представлена математическая модель процесса сушки в барабанной сушильной установке в виде системы линейных дифференциальных уравнений, построенная на принципе поэтапного разделения процесса сушки на стационарный и нестационарный режимы.

2. Получено аналитическое решение модели и доказано, что оно обладает большей по сравнению с существующими численными решениями быстротой и эталонной математической точностью.

3. Представлена программная реализация получения аналитического решения модели, а также идентификации коэффициентов модели.

4. Разработаны алгоритм и программа оптимального управления процессом сушки.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования являлись сушильные установки барабанного типа, предназначенные для сушки сыпучих материалов.

Для решения поставленной цели были использованы: теории линейных дифференциальных уравнений, дифференциальных уравнений в частных производных; теория идентификации моделей и теория управления. В процессе решения теоретических задач и обработки результатов экспериментов применялись прикладные программные пакеты Maple, Excel.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Математическая модель процесса сушки в барабанной сушильной установке в виде системы линейных дифференциальных уравнений, построенная на принципе поэтапного разделения процесса сушки на стационарный и нестационарный режимы.
2. Аналитическое представление движения модели, устанавливающее функциональную зависимость решения от конструктивных параметров системы, обладающее большей по сравнению с существующими численными методами быстротой и эталонной математической точностью.
3. Алгоритм оптимального управления с точки зрения минимума энергетических затрат на технологический процесс сушки.

Практическая значимость. Использование предложенной математической модели процесса сушки в системе автоматического управления сушильными установками барабанного типа позволяет улучшить процесс управления, так как в алгоритме управления, созданном на основе аналитического решения модели, значительно увеличивается скорость выработки управляющих сигналов по сравнению с алгоритмами, построенными на численных решениях. Кроме того, при использовании данного алгоритма значительно снижаются энергетические затраты на технологический процесс сушки, что имеет большое значение для современного производства.

Разработанный алгоритм управления может быть использован в системе автоматического управления сушильными установками барабанного типа, которые широко используются в промышленном производстве и предназначены для сушки разнообразных видов-сыпучих материалов. Предложенная программа для нахождения аналитического решения и решения задачи Коши математической мо-

дели, может использоваться для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, в учебном процессе.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных конференциях и семинарах: New information technologies in pulp and paper industry and energetic, Петрозаводск, сентябрь 1998г.; Новые информационные технологии в ЦБП и энергетике, Петрозаводск, сентябрь 2000г., сентябрь 2002г.; Новые технологии и устойчивое управление в лесах Северной Европы, Петрозаводск, октябрь 2001г.; Компьютерное и математическое моделирование в естественных и технических науках, Тамбов, февраль 2001г.; Республиканская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и соискателей лесного комплекса РК, Петрозаводск, ноябрь 2002г.; научные семинары на кафедре технологии металлов и ремонта ПетрГУ, ноябрь 1999г, декабрь 2003г.

Работа является частью темы «Обоснование и разработка методов оценки показателей надежности элементов конструкций машин и оборудования лесного комплекса», поддерживаемой Министерством образования РФ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и рекомендаций, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы 164 с, 34 рисунка, 3 таблицы. Список использованных источников включает 66 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются ее цель и научные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе рассматриваются вопросы, посвященные общим подходам к математическому моделированию технологических процессов сушки сыпучих материалов.

Работы Иллинеми Л., Балчена Дж., Брамбиллы А., Дейка В., Наджима К., Бусленко Н. П. посвящены проблемам, связанным с моделированием процесса сушки. В работах Харберта Ф., Манна У., Дачесне С, Вьюкова Е. И., Зорина И. Ф., Петрова В. П., Питухина Е.А., Стерлина М. Д. и других авторов рассматриваются вопросы управления сложными техническими системами. Попов Е. П., Ройтенберг Я.Н., Эйкхофф П. М., Прусаков Г.М., Чернецкий В.И. посвятили свои исследования проблемам идентификации и настройки систем управления. Вопросы оптимизации рассматриваются в работах Растргина Л. Н., Маджарова Н.Е, Шупа, Фурунжиева Р. И, Марчука Г. И. и других авторов.

Исследования показали, что сушка - процесс, имеющий большое значение в промышленности, во всех ее отраслях, в частности и в целлюлозно-бумажной промышленности - является достаточно энергоемким процессом, что в условиях современных требований к экономии энергии заставляет задумываться о качественном улучшении систем управления данным процессом.

Несмотря на то, что для различных веществ и для различных условий сушки было предложено большое количество различных теорий, описывающих явление

сушки, их применимость к реальным процессам проблематична по той причине, что явление это сложное и комплексное. Кроме того, количество экспериментальных исследований, которые могут доказать уместность этих теорий в промышленных установках, недостаточно.

В связи со сложностью теоретических моделей, описывающих явление сушки, при конструировании промышленных установок по сушке разработчики систем управления в основном базируются на исследованиях внешних условий сушки. Явление сушки может быть описано кривой, которая представляет собой зависимость скорости сушки от времени.

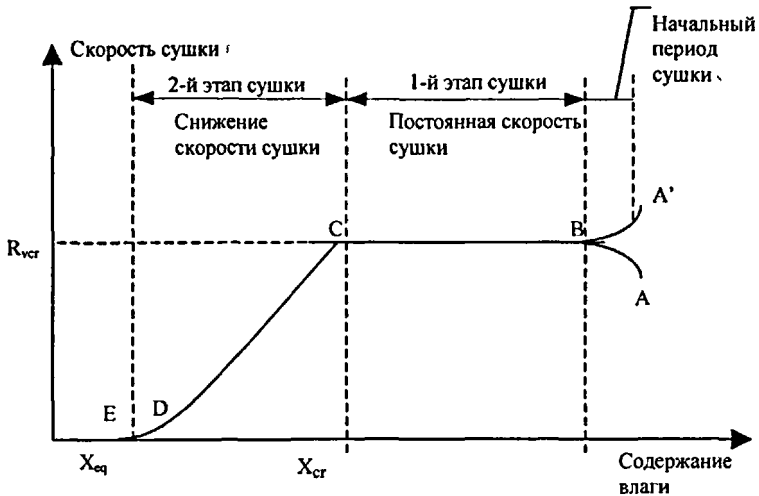


Рисунок 1. Типичная кривая скорости сушки.

В соответствии с рисунком 1 процесс сушки может быть разделен на три части: начальный период сушки, период сушки с постоянной скоростью и период снижения скорости сушки, зависящие от характеристик твердого материала. Как показывают эксперименты этап постоянной скорости сушки - этап «собственно сушки», т. е. выпаривания влаги из материала - представляет собой самый продолжительный по времени процесс, по сравнению с двумя остальными.

В промышленном производстве большое количество гранулированных материалов с частицами 10 мм и больше, которые не обладают большой хрупкостью или чувствительностью к нагреванию сушатся в сушильных установках барабанного типа. Подобные сушилки являются наиболее распространенным типом установок в промышленности. Они представляют собой цилиндрический барабан, обычно сконструированный из стальных пластинок, немного наклонный, обычно 0,3 - 5 м в диаметре, 3 - 5 м в длину и вращающийся. Твердые материалы поступают в верхней части барабана и продвигаются по направлению к нижней части или выходу барабана. Внутри барабана конструируется множество подъемных лопаток для перемешивания материала с тем, чтобы обеспечить его контакт с

газом. Во время вращения барабана материал подбирается лопатками, поднимается до определенного расстояния по окружности барабана, а затем высыпается, проходя сквозь горячую воздушную завесу. Основная сушка происходит именно в этот момент, когда частицы твердого материала находятся в непосредственном контакте с сушащим воздухом.

Факторы, влияющие на моделирование установок барабанного типа, могут быть следующие: физические свойства твердых материалов, такие как размер и форма частиц, плотность и содержание влаги; виды установок, например, диаметр и длина барабана, а также конструкция и количество подъемных лопаток; условия, при которых происходит процесс сушки: скорость подачи материала, температура сушащего воздуха, а также наклон и скорость вращения барабана.

Все данные факторы влияют на передачу тепла в барабане и все, кроме температуры материала и температуры сушащего воздуха играют роль в том, какое количество времени материал будет находиться в барабане. Задержка материала в барабане очень сильно влияет на процесс сушки, так как чрезмерно малая временная задержка хоть и уменьшит скорость процесса, но также как и слишком большая задержка материала, при которой материал останется на дне барабана, приведет в результате к тому, что не будет обеспечено желаемое содержание влаги в материале, следовательно, потребуется возврат материала в барабан, повторная сушка, а значит и увеличение затрат энергии. В конце 1 раздела сформулированы задачи исследования:

1. Проанализировать существующие классы математических моделей и выявить из них наиболее удобные для реализации управления.
2. Провести сравнительный анализ конкретных моделей.
3. Разработать математическую модель сушильной установки, более адекватную реальным процессам сушки и в лучшей степени удовлетворяющую требованиям удобства управления.
4. Идентифицировать коэффициенты модели, провести их настройку под конкретный материал.
5. Рассмотреть возможные критерии оптимизации процесса сушки. Поставить и формализовать задачу оптимизации процесса сушки.
6. Разработать алгоритм оптимального управления процессом сушки твердого материала в сушильной установке барабанного типа.
7. Разработать программу оптимального управления процессом сушки и провести ее апробацию.

Второй раздел посвящен выбору базовой модели процесса сушки в сушильной установке барабанного типа (БСУ) и ее исследованию.

Динамическая модель для процесса сушки в барабанной сушильной установке может быть получена на базе приемлемых допущений, основанных на его физической стороне:

- коэффициенты передачи тепла и массы постоянны;
- передача тепла из-за проводимости материала и сушащего газа незначительна;
- диффузия водяного пара в осевом направлении не принимается во внимание;

передача тепла из-за радиации незначительна;
 скорость проникновения сушащего газа в осевом направлении постоянна;
 распределение размеров гранул материала постоянно;
 в материале не происходят химические реакции во время сушки;
 температуры материала и сушащего воздуха и влажность материала являются лишь функциями времени и осевой координаты.

Для получения динамической модели процесса необходимо иметь на основании уравнений материального баланса уравнение массообмена с учетом кинетики процесса сушки и на основании уравнений теплового баланса уравнения теплообмена. Вывод данных уравнений приводится в разделе.

Базовая модель процесса сушки в БСУ, представленная рядом авторов, имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} + v_m \frac{\partial X}{\partial l} &= -R_v; \\ \frac{\partial Y}{\partial t} + v_g \frac{\partial Y}{\partial l} &= R_v(G_m / G_g); \\ \frac{\partial(C_m T_m)}{\partial t} + v_m \frac{\partial(C_m T_m)}{\partial l} &= \frac{a_v V_v}{G_m} (T_g - T_m) - \lambda R_v; \end{aligned} \quad (0)$$

Уравнения системы представляются собой (ответственно) уравнение материального баланса сушащегося вещества; уравнение материального баланса сушащего воздуха; уравнение теплового баланса сушащегося вещества; уравнение теплового баланса сушащего воздуха.

Используются следующие обозначения: X - влажность материала, кг H_2O / кг (материала); Y - влажность сушащего газа, кг H_2O / кг(материала); T_g - температура сушащего газа, K ; T_m - температура материала, K ; v_m - скорость материала в осевом направлении, м/с; v_g - скорость сушащего газа в осевом направлении, м/с; C_m - удельная теплоемкость материала, Дж/кг \cdot К; C_g - удельная теплоемкость газа, Дж/кг \cdot К; G_m - линейная плотность материала, кг/м; G_g - линейная плотность газа, кг/м; V_v - удельный объем барабана, м³/м; a_v - удель-

ный коэффициент передачи тепла, $\kappa_{Дж/м^2 \cdot К}$ $K-C$ $\lambda_m = \lambda$ - теплота испарения, $Джо / кг$; R_v - скорость сушки, $1 / с$.

Данная общая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных. Найти аналитическое решение такой системы достаточно трудно по ряду причин. Кроме наличия частных производных в левых частях уравнений, в правых частях всех уравнений содержится величина R_v , так называемая, скорость сушки, которая может быть представлена в следующем виде:

$$R_v = \frac{a_v V_v (T_g - T_m) / G_m}{C_v (T_{dp} - T_m) + \lambda}, \quad (2)$$

где C_v - удельная теплоемкость воды, $Дж/кг \cdot К$; T_{dp} - точка росы сушащего газа, $К$. Это выражение содержит переменную T_m в минус первой степени, что делает уравнения общей модели нелинейными и еще более осложняет решение системы. Для получения аналитического решения необходимо провести ряд модификаций общей модели, которые вели бы к ее упрощению.

Ряд авторов ранее занимались этим вопросом, то есть, упрощая модель, приводили ее к виду, имеющему решение. В частности, в разделе 2 приводятся модели Питухина Е. А. и Иллинеми Л., полученные введением дополнительных допущений. Преобразование общей модели сводилось как к преобразованию левой части уравнений, так и к представлению коэффициента скорости сушки R_v в виде:

$$R_v = k_1 X + k_2 T_m + k_3 T_g, \quad (3)$$

где коэффициенты k_1, k_2, k_3 определяются экспериментально и зависят от физических свойств материалов, подвергаемых сушке. Коэффициенты, определяемые по формулам (2) и (3) обозначим соответственно R_{v2} и R_{v1} . Представление коэффициента R_v в виде R_{v1} или R_{v2} зависит от выбора модели.

Однако в разделе показано, что численные решения моделей (при подстановке в правую часть коэффициента (2) или (3)) ведут себя асимптотически одинаково. Это подтверждается тем, что можно добиться полного совпадения решений, подбирая значения коэффициентов k_1, k_2 и k_3 так, чтобы коэффициент R_{v1} (3) заменил коэффициент R_{v2} (2) в правой части уравнений. Следует подчеркнуть, что сведение решения системы с коэффициентом (3) к решению системы с коэф-

коэффициентом (2) имеет теоретическое значение, в качестве проверки асимптотического равенства. Учитывая прикладной характер задачи, при решении системы с коэффициентом (3) должны отражаться характеристики процесса сушки каждого конкретного материала. Это означает, что коэффициенты k_1 , k_2 и k_3 должны быть различными для различных материалов. Определение этих коэффициентов есть задача идентификации и настройки параметров для каждой анализируемой математической модели.

Несмотря на то, что модифицированные модели, полученные рядом авторов, представляли собой системы обыкновенных дифференциальных уравнений (с коэффициентом (3) в правой части), авторы не стремились к поиску аналитического решения и находили численные решения своих моделей.

С целью проверки адекватности модифицированных моделей базовой модели (1) решение общей системы (1), представленное в разделе 2, было получено численным методом, путем разложения системы уравнений в частных производных в систему разностных уравнений, при представлении искомых функций дискретным множеством своих значений. Анализ численных решений модифицированных моделей показал, что они имеют невысокую точность. Таким образом, ставится задача поиска математической модели, имеющей аналитическое решение и адекватной реальному процессу сушки.

В третьем разделе разрабатывается модель процесса сушки в БСУ, приводится ее аналитическое решение и проводится исследование и идентификация.

Преобразование математической модели, основано на разделении процесса сушки на два этапа - стационарный и нестационарный. 1-й этап сушки (самый длительный этап процесса) представляет собой процесс, где скорость сушки практически не зависит от времени (рис. 1). Основываясь на допущении о неизменности скорости сушки во времени и применению асимптотического подхода к решению общей системы (1), из уравнений общей модели исключаются члены, содержащие параметр времени. На основании этого модель преобразуется в систему линейных дифференциальных уравнений с производной по длине барабана l .

$$\begin{aligned}
 v_m \frac{dX}{dl} &= -R_v; \\
 v_g \frac{dY}{dl} &= R_v(G_m/G_g); \\
 v_m \frac{d(C_m T_m)}{dl} &= \frac{a_v V_v}{G_m} (T_g - T_m) - \lambda R_v; \\
 v_g \frac{d(C_g T_g)}{dl} &= -\frac{a_v V_v}{G_g} (T_g - T_m) - \lambda_m \frac{G_m}{G_g} R_v.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Такая модифицированная система линейных дифференциальных уравнений с коэффициентом R_{v_1} (3) решается строгим аналитическим способом.

Приводится общее аналитическое решение модели (4) и частное решение (решение задачи Коши), полученное при подстановке в общее решение заданных начальных условий.

Проводится исследование модели (4) при подстановке в правую часть коэффициентов (2) и (3). Сравнение показывает, что наименьшее отклонение в процентном отношении (от 0,1% до 5,4%) наблюдается у модели (4) при подстановке в правую часть уравнений коэффициента (3) (с коэффициентом (2) в правой части отклонения составляют от 0,3% до 42,3%). Это позволяет использовать модель (4) с коэффициентом (3) в дальнейших задачах идентификации и оптимизации управления сушильной установкой.

Итак, в выбранную в процессе структурной идентификации математическую модель процесса сушки в БСУ, входят обыкновенные линейные дифференциальные уравнения вида:

$$\sum_{i=0}^p a_i x^{(i)} = \sum_{j=0}^l b_j y^{(j)}, \quad (5)$$

где $x^{(i)}$ - i -я производная функции $x(t)$, $y^{(j)}$ - j -я производная функции $y(t)$, т.е. $x^{(i)} = d^{(i)}x/dt^{(i)}$, $y^{(j)} = d^{(j)}y/dt^{(j)}$, $a_p = 1; l \leq p$.

Как видно модель определяется $p + l + 1$ параметрами

$$C = (a_0, a_1, \dots, a_{p-1}, b_0, \dots, b_l). \quad (6)$$

Структурными параметрами модели (5) являются числа p и l , которые должны быть выбраны в процессе структурной идентификации.

Эту модель удобно записывать в векторной форме:

$$\dot{X} = AX + BU, \quad (7)$$

где $X = (x_1, \dots, x_p)$ - вектор состояния; $U = (u, u^{(1)}, \dots, u^{(l)})$ - вектор возмущения; A и B - матрицы коэффициентов модели, причем $A = \left\| a_{qi} \right\|$ - квадратная матрица $(p \times p)$, а $B = \left\| b_{qi} \right\|$ - прямоугольная матрица $[p \times (l + 1)]$.

Таким образом, идентифицируемыми параметрами модели (4) являются элементы матриц A и B , т.е. $p(p + l + 1)$ параметров, которые и образуют две матрицы неизвестных параметров $C = (A, B)$.

Исходной информацией для идентификации в этом случае являются функции x_t и y_t в промежутке $0 \leq t \leq T$, характеризующие состояния входа и выхода идентифицируемого объекта

$$\langle x_t, y_t \rangle \quad 0 \leq t \leq T. \quad (8)$$

Для построения процедуры идентификации необходимо определить $p + l + 1$ параметров $a_i (i = 0, \dots, p-1)$ и $b_j (j = 0, \dots, l)$.

В общем случае, т.е. при произвольных значениях a_i и b_j , при подстановке реализаций (8) в уравнение (5) равенство в (5) выполняться не будет. Естественно подобрать параметры a_i и b_j такими, чтобы равенство (5) было восстановлено или хотя бы правая и левая части выражения (5) отличались друг от друга наименьшим образом. Чтобы выполнить это условие, необходимо построить функцию невязки правой и левой частей этого уравнения и минимизировать ее с помощью вариации параметров a_i и b_j .

Требования, которым должна удовлетворять эта функция невязки следующие:
она не должна принимать отрицательных значений;
ее минимум должен соответствовать решению поставленной задачи;
этот минимум должен быть равен нулю в случае совпадения структуры модели и объекта.

Этим условиям удовлетворяет невязка в виде среднего квадрата разности правой и левой частей уравнения модели (5) при подстановке туда функций x_t и y_t - наблюдений объекта, т.е.

$$Q(C) = \int_0^T \left[\sum_{i=0}^p a_i x_t^{(i)} - \sum_{j=0}^l b_j y_t^{(j)} \right]^2 dt. \quad (9)$$

Минимизируя это выражение по параметрам a_i и b_j , которые образуют вектор (6), определим искомые параметры. Такая задача минимизации формулируется в виде

$$Q(C) \rightarrow \min \Rightarrow C^* = (a_0^*, \dots, a_{p-1}^*; b_0^*, \dots, b_l^*). \quad (10)$$

Результат минимизации C^* и дает значения идентифицируемых параметров, для которых при совпадении структуры объекта и модели

$$Q(C^*) = 0. \quad (11)$$

В модели (4) с коэффициентом скорости сушки (3), идентифицируемыми параметрами являются коэффициенты k_1, k_2, k_3 . В этой модели элементы параметрической матрицы A системы (матрицы пространства состояний) представляют собой сложные функциональные зависимости от параметров системы, что делает невозможным выполнение условия (11), если коэффициенты k_1, k_2, k_3 постоянны.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{k_1}{v_m}, & 0, & -\frac{k_2}{v_m}, & -\frac{k_3}{v_m} \\ \frac{k_1 G_m}{v_g G_g}, & 0, & \frac{k_2 G_m}{v_g G_g}, & -\frac{k_3}{v_m} \\ -\frac{\lambda k_1}{v_m C_m}, & 0, & \frac{-\frac{a_v V_v}{G_m} - \lambda k_2}{v_m C_m}, & \frac{\frac{a_v V_v}{G_m} - \lambda k_3}{v_m C_m} \\ -\frac{\lambda G_m k_1}{v_g C_g G_g}, & 0, & \frac{\frac{a_v V_v}{G_g} - \lambda G_m k_2}{v_g C_g}, & \frac{\frac{a_v V_v}{G_g} - \lambda G_m k_3}{v_g C_g} \end{bmatrix}$$

Так как добиться равенства нулю функции невязки при постоянных коэффициентах k_1, k_2, k_3 невозможно, то поведение переменных состояния модели и теплофизических характеристик объекта будет отличаться. Это показывают достаточно большие отклонения при сравнении поведения аналитического решения модели (4) с сушкой в печи (отклонения составили от 16,3% до 37,3%).

Для проверки адекватности модели (4) реальному процессу сушки использовались данные для различных режимов сушки в экспериментальной БСУ (университет г. Оулу (Финляндия)).

Коэффициенты k_1, k_2, k_3 , которые позволяют настроить модель на конкретный режим работы, определяют так называемый условный коэффициент скорости сушки (3). Поскольку скорость сушки теоретически зависит от изменения входной влажности материала X_{in} , входной температуры материала $T_{m,in}$ и входной температуры сушащего воздуха $T_{g,in}$, идентификация коэффициентов k_1, k_2, k_3 должна проводиться для каждого нового режима работы установки в смысле изменений данных параметров

Следовательно, коэффициенты k_1, k_2, k_3 для обеспечения лучшей адекватности модели реальным процессам сушки в БСУ должны быть не константами, а функциями от некоторых входных воздействий системы.

Зададим коэффициенты в виде зависимостей от выбранных параметров, так, чтобы функция невязки стремилась к нулю. Это достигается минимизацией функционала невязки, который в нашем случае имеет вид:

$$\left[X(l=L, X^e in, T_g^e in, v_m^e, v_g^e, k_1, k_2, k_3) - X^e out \right]^2 + \\ \left[T_g(l=L, X^e in, T_g^e in, v_m^e, v_g^e, k_1, k_2, k_3) - T_g^e out \right]^2 + \\ \left[T_m(l=L, X^e in, T_g^e in, v_m^e, v_g^e, k_1, k_2, k_3) - T_m^e out \right]^2 \rightarrow \min, \quad (12)$$

где индексы означают: e - значение взято из эксперимента; in - входные значения параметров; out - выходные значения параметров, L - длина барабана, м.

При достижении функционалом (12) минимума в окрестности нуля получаем значения идентификационных коэффициентов k_1, k_2, k_3 . Задача нахождения минимума решается методом случайного поиска с сужением интервалов.

Пример нахождения минимума целевой функции невязки для одного из режимов работы установки иллюстрируется рисунком 2.

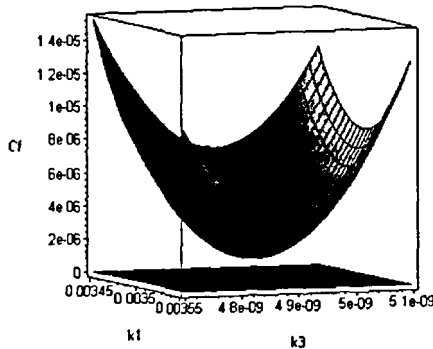


Рисунок 2. Нахождение минимума целевой функции невязки (12).

Данные коэффициенты, полученные для ряда опытов, заносятся в сводную таблицу экспериментальных данных, из которой путем аппроксимации находятся функциональные зависимости коэффициентов k_1, k_2, k_3 от параметров системы.

При подстановке найденных функциональных зависимостей в полученное аналитическое решение системы (4), из решения исключаются коэффициенты

k_1, k_2, k_3 , и математическая модель процесса сушки оптимальным образом настраивается под конкретную БСУ и сушащийся материал.

Проведенное сравнение результатов моделирования идентифицированной модели с различными режимами работы экспериментальной БСУ показало разброс в пределах от 5,4% до 11,7% с учетом линейного вида аппроксимирующей функции.

Четвертый раздел посвящен оптимизации управления процессом сушки.

Выбор критерия оптимизации связан с достижением поставленной в работе цели — снижение энергетических затрат на технологический процесс сушки.

Целевая функция найдена, исходя из следующих соображений.

Пусть M_m - партия материала, подлежащего сушке, кг; F_m - максимально допустимая подача материала, кг/с. Тогда общее время, требуемое на сушку данной партии материала, с:

$$t_t = \frac{M_m}{F_m}. \quad (13)$$

Очевидно, что допустимая подача материала в барабан определяется скоростью осевого перемещения материала в барабане и плотностью материала [9]:

$$F_m = v_m G_m, \quad (14)$$

где v_m - осевая скорость материала в барабане, м/с, G_m - линейная плотность материала, кг/м³

Для сушки партии материала M_m требуется за общее время сушки израсходовать массу сушащего газа M_g , кг:

$$M_g = t_t F_g, \quad (15)$$

где F_g - максимально допустимая подача сушащего воздуха, кг/с, которая, в свою очередь равна

$$F_g = v_g G_g, \quad (16)$$

где v_g - осевая скорость сушащего воздуха, м/с, G_g - линейная плотность сушащего воздуха, кг/м .

С учетом уравнений (13), (14) и (15) имеем массу газа, кг:

$$M_g = \frac{M_m}{v_m G_m} v_g G_g. \quad (17)$$

С учетом (17) энергетические затраты на процесс сушки партии материала в БСУ можно выразить через количество энергии, отданной газом материалу, Дж:

$$E = C_g \frac{M_m}{v_m G_m} v_g G_g (T_g^{in} - T_g^{out}), \quad (18)$$

где C_g - удельная теплоемкость газа, Дж/кг*К; T_g^{in} - начальная температура сушащего воздуха, К; T_g^{out} - конечная температура сушащего воздуха, К.

Базовая целевая функция C_1 получена на основе выражения (18) и представляет собой удельные энергетические затраты на передачу тепла от газа одному килограмму материала внутри барабана, Дж/кг:

$$C_1 = C_g \frac{v_g G_g}{v_m G_m} (T_g^{in} - T_g^{out}), \quad (19)$$

где T_g^{out} представляет собой функциональную зависимость, полученную при аналитическом решении системы (4).

При выборе управляющих параметров рассматривается вектор потенциальных внешних воздействий:

$$U = \left. \begin{array}{c} T_m \\ X \\ G_g \\ G_m \\ v_m \\ v_g \\ T_g^{in} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{возмущающие} \\ \\ \\ \text{управляющие} \end{array} \quad (20)$$

Для того чтобы иметь на выходе определенное значение содержания влаги в материале достаточно варьировать температуру и поток (расход) сушащего воздуха. То есть, максимально снижая, например, входную температуру газа T_g^{in} , на выходе иметь удовлетворительно высушенный материал. Уменьшать температуру и расход газа, уменьшая тем самым затраты, можно лишь до определенного предела, критерием в данном случае служит влажность материала на выходе барабана. Кроме того, при снижении скорости подачи материала увеличивается время задержки материала в барабане, что также приводит к более низкому содержанию влаги в материале на выходе. Таким образом, в качестве управляющих параметров выбираем T_g^{in} , v_g и v_m .

Следует отметить, что выбор именно этих теплофизических характеристик (T_{gin} , v_m и v_g) в качестве основных управляющих параметров будет справедливым в случае удовлетворения функционального ограничения. Это ограничение определяется возможностью получения заданного содержания влаги в материале на выходе барабана при заданной скорости подачи материала v_m , которая определяет время нахождения материала внутри барабана, и при максимально допустимых значениях температуры T_{gin} и расхода (пропорционального осевой скорости v_g) сушащего воздуха.

Задание определенной скорости подачи материала v_m связано, прежде всего, с общим временем t_t , требуемым для сушки конкретной партии материала M_m .

Предположим, что имеется коммерческое предложение высушить партию материала M_m за время t_t с начальной влажностью X_{in} до конечной влажности X_{cr} за некоторую сумму P . Согласно (13,14) общее время $t_t = \frac{M_m}{v_m G_m}$ Таким образом, жестко задается скорость подачи материала v_m , которой определяется время нахождения материала в барабане (время задержки) $t_d = \frac{L}{v_m}$. Вышеперечисленные параметры влияют на конечную влажность твердого материала, которая должна быть меньше X_{cr} . Определяется возможность проведения требуемого процесса сушки исходя из технических возможностей работы установки и ее управления, которые задаются в виде областных и функциональных ограничений.

Если данные ограничения не выполняются по техническим причинам, рассчитывается новое приемлемое для заказчика время- t_t . При этом определяется стоимость расчетного энергетического режима установки, которая будет являться основной частью стоимости контракта. Если заказчик не возражает против новых условий (например, удорожания или увеличения времени сушки), то рассчитывается соответствующий режим управления.

Чтобы привлечь заказчика необходимо минимизировать стоимость контракта. Одно из решений данной задачи - расчет оптимального режима работы установки с точки зрения минимума энергетических затрат.

В результате исследования режимов экспериментальной работы установки и идентификации модели обобщаются практические принципы управления БСУ.

Основное управление в пределах номинального режима осуществляется заданием входной температуры сушащего воздуха $T_{g\text{in}}$ и его расхода $F_g = v_g G_g$, пропорционального скорости v_g . При сильном изменении возмущающих параметров управление переходит на новый этап, на котором определяется новое значение скорости подачи материала v_m , удовлетворяющее заданному функциональному ограничению.

Таким образом, алгоритм оптимального управления состоит из двух уровней:

- I. Установившийся - управление процессом сушки в номинальном режиме (изменение входной влажности материала не нарушает выполнение функционального ограничения) и осуществляется с помощью параметров $T_{g\text{in}}$ и v_g
- II. Переходный - управление процессом сушки переходит из предыдущего установившегося режима в новый установившийся режим и осуществляется с помощью выбора новой скорости подачи материала v_m

Процесс принятия решения о выборе этапа управления при изменении входной влажности материала может обуславливаться не только удовлетворением функционального ограничения (критериев сушки), но и принятием в расчет критериев оптимальности.

Основным функциональным ограничением является необходимость иметь при завершении процесса сушки удовлетворительно высушенный материал. Это означает, что конечное содержание влаги в материале не должно превышать заданного критического значения X_{cr} . Таким образом, функциональное ограничение следующее:

$$X(l = L, T_{g\text{in}}, X_{in}, v_g, v_m) \leq X_{cr} \quad (21)$$

Областные ограничения получены из технологических условий эксплуатации установки. Диапазон изменения части управляющих и возмущающих параметров определяется следующими неравенствами:

$$420 \leq T_g \leq 500, \text{K}; \quad 0,1 \leq v_g \leq 1, \text{ м/с}, \quad 0,00178 \leq v_m \leq 0,00778, \text{ м/с}; \\ 0,5\% \leq X_{in} \leq 20\% .$$

Данные неравенства задают область допустимых проектных параметров Ω .

В системе управления процессом сушки оптимизируется поле разброса 3-х параметров: $T_{g\text{in}}$ - входная температура сушащего воздуха, К; v_g - скорость подачи сушащего воздуха, м/с; v_m - скорость подачи материала, м/с.

Задача оптимизации ставится следующим образом:

$$C_1 \left\langle T_g^*, v_g^*, v_m^* \left| X_{out}(l=L, T_g^{in*}, v_g^*, v_m^*) < X_{cr} \right. \right\rangle =$$

$$\min_{\{T_g^{in}, v_g, v_m\} \in \Omega} C_1 \left\langle T_g, v_g, v_m \left| X_{out}(l=L, T_g^{in}, v_g, v_m) < X_{cr} \right. \right\rangle$$

где T_g^{in*}, v_g^*, v_m^* - оптимальные параметры управления, которые сводят функционал энергопотребления к минимуму.

Оптимальные параметры находятся по следующему алгоритму:

проверка функционального ограничения (21), при выполнении ограничения фиксируется диапазон изменения скорости подачи материала

v_m .

нахождение зависимости T_g^{in} от v_g с помощью аппроксимации на

рабочем участке сушки на основе кубического полинома;

учет функционального ограничения в целевой функции при подстановке в нее полученной зависимости:

$$C_1 \left\langle (T_g^{in}, v_g, v_m) \left| v_g = f(T_g^{in}) \right. \right\rangle = C_1^{(0)}(T_g^{in}, v_m)$$

нахождение значения T_g^{in} (при фиксированном значении v_m), при

котором значение целевой функции минимально

Эффективность управления при использовании оптимальных управляющих параметров, найденных по данному алгоритму, оценивается при сравнении с несколькими режимами работы экспериментальной БСУ. Изменяются только управляющие параметры при прочих равных условиях. Снижение энергетических затрат составляет от 40% до 62%.

Предложенный алгоритм расчета оптимальных параметров процесса может быть использован для любого режима работы установки при настройке модели с помощью идентификации коэффициентов под сушку конкретного вида материала. Предложенная в работе модель процесса сушки может применяться для анализа и управления подобными процессами в иных установках, принцип действия которых можно описать уравнениями тепло- и массопереноса.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Базовая модель процесса сушки, представленная в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных, обладает наибольшей степенью адекватности, однако не имеет аналитического решения.

2. Результаты численного решения базовой модели, осуществленного методом конечных разностей при достаточно большом количестве узлов сетки, могут служить основой для оценки точности математических моделей, полученных на основе базовой путем введения различных допущений.
3. Представлена математическая модель сушильной установки, основанная на новом подходе к рассмотрению процесса сушки - разделение на стационарный и нестационарный режимы. Модель адекватна реальным процессам сушки и удобна для управления.
4. Найдено общее аналитическое решение предложенной математической модели и решена задача Коши.
5. Представлена программная реализация получения аналитического решения модели, а также идентификации коэффициентов модели.
6. Формализована задача оптимизации управления процессом сушки по критерию минимизации энергозатрат.
7. Разработан оптимальный алгоритм управления процессом сушки сыпучих материалов в сушильной установке барабанного типа и его программная реализация, алгоритм настраивается под любые типы барабанных сушилок и характеристики материалов, подвергаемых сушке.
8. Установлено, что для сушки кальцита в установке барабанного типа, имеющейся в университете г. Оулу (Финляндия), при управлении с использованием оптимальных значений управляющих параметров для различных режимов работы энергетические затраты могут быть снижены от 40% до 62%.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Pitukhin E. A., Yanyuk J. The design of an optimal control algorithm for the DAMATIC-XD system for decreasing the use of energy in afterflotational drying of wood chips// New information technologies in pulp and paper industry and energetic, Petrozavodsk State University. 1998.P. 37-38.
2. Питухин Е. А., Янюк Ю.В. Идентификация и настройка математической модели сушильной установки//Ресурсосберегающие технологии лесного комплекса/КарНИИЛП, Петрозаводск, 1998. С. 32-33.
3. Питухин Е. А., Куколев М. И., Янюк Ю. В., Демьяненко Г.И Синтез системы оптимального управления солнечной космической энергоустановкой//Труды Петрозаводского Государственного Университета. Прикладная математика и информатика/Изд-во ПетрГУ, Петрозаводск, 1999. Вып. 7. С. 67-68.
4. Янюк Ю. В. Оптимальное моделирование и разработка алгоритмов управления процессом сушки щепы на основе аналитического решения математической модели сушильной установки в частных производных/Новые информационные технологии в ЦБП и энергетике/Изд-во ПетрГУ, Петрозаводск, 2000. С. 73-74.

5. Питухин Е. А., Янюк Ю. В. Куколев М. И., Климюк С.В. Моделирование системы управления подачей пара в сушильные цилиндры бумагоделательных машин//Новые информационные технологии в ЦБП и энергетике/Изд-во ПетрГУ, Петрозаводск, 2000.С. 57-58.
6. Янюк Ю. В. Оптимальное управление барабанной сушильной установкой с точки зрения теории нечетких множеств//Новые технологии и устойчивое управление в лесах Северной Европы/Изд-во ПетрГУ, Петрозаводск, 2001. С. 158.
7. Янюк Ю. В., Питухин Е. А. Применение теории нечетких множеств для оптимизации управления сушильной установкой барабанного типа/Материалы конференции КММ-3/Тамбовский Государственный университет, Тамбов, 2001. С. 34-35.
8. Янюк Ю. В. Математическая модель процесса сушки в сушильной установке барабанного типа и один из способов ее решения/ВИНИТИ, №2658-B2001, указатель №2, Москва, 2002. 27 с.
9. Янюк Ю. В. Обоснование выбора аналитического решения модели процесса сушки в сушильной установке барабанного типа//Сборник молодых ученых. Новые технологии и устойчивое развитие в лесах Карелии/Изд-во ПетрГУ, Петрозаводск, 2002. С. 39-40.
10. Янюк Ю. В., Питухин Е. А. Об оптимизации управления сушильной установкой барабанного типа// Новые информационные технологии в ЦБП и энергетике/Изд-во ПетрГУ, Петрозаводск, 2002.С. 112-114.
11. Янюк Ю. В., Питухин Е. А. Преобразование математической модели процесса сушки для управления сушильной установкой барабанного типа//Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ/Изд-во ПетрГУ, Петрозаводск, 2003. Вып. 4. С. 191-196.

ЛР ИД №02969 от 06.10.2000.

Гигиенический сертификат № 10.КЦ.34.953.П.00136.03.99 от 05.03.99.

Подписано в печать 21.01.04. Формат 60 x 84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Уч.-изд. л. 1.4. Усл. кр.-отг. 7. Тираж 100 экз. Изд. №9.

Петрозаводский государственный университет

Типография Издательства Петрозаводского государственного университета

185640, Петрозаводск, пр. Ленина, 33

№ - 2478

РНБ Русский фонд

2004-4

27960