

На правах рукописи



Липин Антон Владимирович

КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ  
В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

Специальность: 05.11.13 - приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Барнаул – 2006

Работа выполнена в Алтайском государственном техническом  
университете им. И.И. Ползунова

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Замятин Виктор Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Якунин Алексей Григорьевич

кандидат технических наук  
Степаненко Сергей Анатольевич

Ведущая организация: Северская государственная технологическая  
академия

Защита состоится 26 декабря 2006 г. В 12.00 на заседании  
диссертационного совета Д212.004.06 Алтайского государственного  
университета им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, Барнаул, пр.  
Ленина, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского  
государственного технического университета.

Автореферат разослан 24 ноября 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, д.т.н., профессор

Пронин С.П.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В процессе производства химико-фармацевтической продукции широко используется конвективная сушка. Одной из ее разновидностей является сушка в псевдооживленном (кипящем) слое. Очевидными достоинствами псевдооживленных систем являются такие параметры, как развитая поверхность контакта твердого материала и осушающего агента, высокие теплообменные характеристики, возможность непрерывного ввода и вывода твердой фазы.

На этапе сушки формируются эксплуатационные характеристики продукта, его химико-физические свойства. От качества сушки, в итоге, напрямую зависит качество конечного продукта (таблетки, порошка, капсулы и др.). В свою очередь, процесс сушки в псевдооживленном слое недостаточно изучен, и решение таких задач, как интенсификация и контроль процесса, затруднено. В связи с этим, появляется необходимость разработки новых способов мониторинга и контроля процесса сушки в псевдооживленном слое, позволяющих повысить качество продукции, улучшить возможности интенсификации, сократить энергозатраты и уменьшить потери за счет автоматизации.

Таким образом, мониторинг и контроль процесса сушки в псевдооживленном слое является актуальной задачей, имеющей большое прикладное значение.

**Цель** диссертационной работы заключается в разработке программно-аппаратного комплекса мониторинга и методики контроля технологических параметров процесса сушки химико-фармацевтических смесей в псевдооживленном слое.

### **Задачи исследования:**

- Рассмотреть математическую модель сушки в псевдооживленном слое, связывающую параметры осушающего агента и материала;
- Разработать алгоритм вычисления параметров материала по состоянию осушающего агента в псевдооживленном слое;
- Определить набор необходимого аппаратного обеспечения для мониторинга параметров псевдооживленного слоя;
- Спроектировать и изготовить экспериментальную установку для мониторинга и контроля технологических параметров процесса сушки;
- Провести экспериментальные исследования процесса сушки химико-фармацевтических смесей в кипящем слое на производстве;
- Исследовать процесс сушки и провести анализ полученных данных;
- Синтезировать программно-аппаратный комплекс на основе полученных результатов.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач при выполнении работы использовались теоретические и экспериментальные методы исследования. Экспериментальные исследования проводились на базе производственного

предприятия ООО «Химфарм» г. Барнаул.

**Научная новизна работы:**

- Произведено теоретическое и экспериментальное обоснование рациональной модели процесса сушки многокомпонентных химико-фармацевтических смесей;
- Разработана методика, позволяющая определять параметры материала в процессе сушки по состоянию осушающего агента, не рассматривая другие технологические параметры.

**Практическая ценность работы:**

- Разработанная система мониторинга и контроля параметров кипящего слоя позволила сократить длительность сушки, увеличить выход готового продукта, улучшить качество готового продукта, осуществить автоматизацию процесса;
- Получены обобщенные кинетические зависимости параметров ряда химико-фармацевтических материалов;
- Разработанный метод контроля параметров кипящего слоя позволяет синтезировать автоматические системы контроля широкого круга использования. Подобные системы могут быть использованы для решения широкого круга задач, связанных с контролем параметров производственных процессов.

**Реализация научно-технических результатов:**

В результате проведенных исследований была разработана программно-аппаратная система контроля влажности дисперсных материалов в сушилках кипящего слоя СГ-30. Система внедрена на производственное предприятие ООО «Химфарм» г. Барнаул.

**На защиту выносятся:**

- Методика экспериментального определения параметров процесса сушки по характеристикам параметров сушильного агента;
- Методика контроля технологических параметров химико-фармацевтических смесей при сушке в кипящем слое с использованием приборов DS2438, НН3610, ротаметра на базе сети microlan;
- Алгоритм вычисления температуры и влажности материала на основе параметров осушающего агента.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы были представлены в докладах на конференциях: «Измерение, контроль, информатизация -2002, 2003», "Виртуальные и интеллектуальные системы -2006".

**Публикации.** По материалам выполненных в диссертационной работе исследований опубликовано 8 печатных работ, в которых изложено основное содержание диссертации.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов исследования, списка использованной литературы и приложений. Основное содержание изложено на 125 страницах машинописного текста, содержит 26 иллюстраций и 9 таблиц. Список литературы состоит из 92 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируется цель работы, определяются задачи диссертации. Показана научная новизна работы и ее практическая значимость.

**В первой главе** «Теоретические представления о процессе конвективной сушки дисперсных материалов» рассмотрено состояние проблем производства с применением технологии псевдооживления и основные направления развития сушильных установок в химико-фармацевтической промышленности. В главе дана классификация продуктов химико-фармацевтического производства. Рассмотрено технологическое оборудование и методы сушки. Рассмотрены различные варианты реализации процесса конвективной сушки. Определены цели и задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** «Математическая модель процесса конвективной сушки в псевдооживленном слое с рециркуляцией осушающего агента» рассмотрена математическая модель процесса сушки, рассмотрены зависимости между материалом и осушающим агентом в процессе сушки. Определяются основные технологические параметры процесса сушки, анализируются методы измерения параметров.

В процессе сушки происходят одновременно два процесса: испарение влаги (массообмен) и перенос тепла (теплообмен). Массообменом в процессе сушки называется процесс переноса жидкости из твердой фазы в газовую. Движущей силой процесса массообмена является разность концентраций пара на поверхности тела и в окружающей среде. Теплообменом называется любой процесс переноса теплоты, в котором она самопроизвольно переходит от более нагретой среды к менее нагретой. Движущей силой процесса переноса теплоты является разность температур.

В данном случае мы имеем вынужденный конвективный теплообмен, т.е. тепло передается к материалу через теплоноситель (осушающий агент). Теплообмен, осложненный массообменом, имеет специфические особенности в сравнении с чистым теплообменом.

Основными технологическими параметрами процесса сушки является влажность и температура материала. Прямое измерение параметров материала в данном процессе сушки затруднительно по ряду причин: движение псевдооживленного материала в потоке горячего воздуха, перемешивание материала, высокие показатели испарения с поверхности материала, высокая запыленность.

Рассмотрим математическую модель процесса конвективной сушки дисперсных материалов.

Для упрощения задачи расчета примем ряд допущений:

1. Температура влажных частиц равномерна по их объему и равна температуре мокрого термометра  $t_m$ ;
2. Температура материала  $T^i$  одинакова по всему объему слоя;
3. Влажность материала  $U$  равномерна по всей высоте слоя;
4. Частицы высушиваемого материала монодисперсны;
5. Ввиду рециркуляции осушающего агента примем, что потери тепла отсутствуют.

Согласно закону сохранения энергии все тепло, подведенное к продукту, затрачивается на испарение влаги и нагрев продукта.

Плотность теплового потока может быть выражена уравнением теплоотдачи Ньютона, а также зависимостью между количеством испарившейся влаги и затраченной энергии в период постоянной скорости сушки:

$$\frac{dQ}{Sd\tau} = \alpha(t - t) = \left( \frac{dW}{Sd\tau} \right), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>\*К);  $S$  – площадь поверхности тела, м<sup>2</sup>;  $(t-t)$  – разность температур поверхности тела и соприкасающейся с ним среды, °C;  $r$  – теплота испарения влаги;  $dW/d\tau$  – скорость испарения влаги;  $t$  – температура осушающего агента.

В период падающей скорости сушки часть поступающей теплоты затрачивается на нагрев материала:

$$\alpha(t' - t) \frac{dW}{Sd\tau_{вл}} = \frac{dI}{d\tau}, \quad (2)$$

где  $c_{вл}$  – теплоемкость влажного продукта, Дж/(кг К);  $m_{вл}$  – масса влажного продукта,  $dT/d\tau$  – скорость нагрева продукта.

Для смеси состоящей из  $n$  компонентов должно выполняться:

$$c_{вл} m_{вл} \sum_{i=1}^n (c_0^i (1 - U^i) + c_e U^i) m_{вл}^i, \quad (3)$$

где  $c_0^i$ ,  $c_e$  – удельные теплоемкости соответственно абсолютно сухого компонента  $i$  и влаги, Дж/(кг К);  $U^i$  – массовая доля влаги в компоненте  $i$ ;  $m_{вл}^i$  – масса влажного компонента  $i$ .

Уравнение массоотдачи в газовой фазе

$$\frac{dW}{Sd\tau} = \beta_x (X_n - X), \quad (4)$$

где  $\beta_x$  – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний осушающего агента, кг/(м<sup>2</sup>с);  $(X_n - X)$  – разность влагосодержаний агента (движущая сила по газовой фазе).

Влагосодержание материала

$$U = \frac{W}{M_T}, \quad (5)$$

где  $W$  – масса влаги в материале;  $M_T$  – масса сухого продукта.

Выразим (4) через влагосодержание материала

$$\frac{dU}{d\tau} = \frac{G(X_n - X)}{M_m}, \quad (6)$$

где  $G$  – массовый расход сушильного агента, (кг/с);  $M_m$  – масса влажного материала.

Интенсивность изменения температуры материала можно выразить из выражений (2) и (4):

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{c_{вл} m_{вл}} (\alpha(t' - t))_{x_n}. \quad (7)$$

В условии рециркуляции агента температуру сухого материала можно принять равной температуре осушающего агента  $t$ . Таким образом, значение температуры материала в псевдооживленном слое может быть определено как среднее взвешенное из температур влажной и сухой доли:

$$T = t_m(U) + t(1 - U). \quad (8)$$

Система уравнений (3),(6),(7),(8) представляет собой математическое описание процесса сушки дисперсного материала в псевдооживленном слое в рамках сделанных допущений.

Расчет процесса сушки по предложенным уравнениям представляет большие трудности, так как в объектах сушки происходит взаимосвязанный теплообмен: удаление влаги и одновременный нагрев влажного материала. Взаимосвязь процессов обусловлена тем, что массообменные коэффициенты зависят от температуры, а тепловые – от концентрации влаги в материале при условии частичной рециркуляции осушающего агента. Вычисление выражения (3) также представляет собой трудоемкую задачу, т.к. в процессе сушки скорость изменения массовой доли влаги в каждой компоненте смеси различна.

На практике целесообразно использовать выражение (6) описывающее интенсивность изменения влагосодержания материала по состоянию сушильного агента и выражение (8), позволяющее оценить температуру материала в процессе сушки.

Таким образом, мы выделили основные параметры процесса сушки, которые наиболее значимы.

Исходя из технико-экономических показателей, мы полагаем, что температура на выходе из сушилки должна быть, по возможности, низкой, но не ниже температуры, определяемой условиями равновесия высушиваемого материала с влажным воздухом. Это необходимо для достижения требуемой остаточной влажности продукта. Температура сушильного агента на входе в сушильную камеру

должна быть как можно выше, но с учетом допустимой температуры материала для сохранения качественных показателей продукта.

Расчет параметров материала необходимо будет производить через состояние осушающего агента в двух точках: на входе в сушилку и на выходе из нее. Для каждой точки необходимо измерить температуру и влагосодержание осушающего агента. Также необходимо знать объемный расход газа и его скорость в сушилке. Таким образом, мы определим интенсивности испарения влаги. Для измерения данных параметров необходимо было разработать программно-аппаратный комплекс. Основной задачей данного комплекса стало фиксирование параметров процесса конвективной сушки на всем его протяжении для их последующей обработки и анализа.

**В третьей главе** «Описание экспериментальной установки и методики проведения эксперимента процесса конвективной сушки» рассматривается схема экспериментальной сушильной установки и методика поведения эксперимента.

В главе анализируются возможности современных приборов измерения параметров воздушной среды. Определяется набор приборов, отвечающих технологическим требованиям процесса конвективной сушки в псевдооживленном слое. Мониторинг температуры осушающего агента производился датчиком DS2438 Dallas Semiconductor. Для мониторинга относительной влажности осушающего агента использовался датчик НН 3610. В качестве датчика скорости воздушного потока использовался кулер 80x80. Использование данного датчика обусловлено приемлемой точностью измерения.

Контроль механизмов и узлов решено производить через электронные адресуемые ключи на базе прибора DS2406 (ML06h). Для сопряжения прибора ML06h с сетью питания узлов сушилки применялись семисторные развязки.

Все приборы входят в состав сети microlan. Данная технология построена на использовании одного канала связи и позволяет масштабировать аппаратную часть системы мониторинга и контроля параметров процесса. Так как реализацию алгоритмов сбора, хранения и обработки, данных процесса сушки целесообразнее всего реализовать на языке высокого уровня, то в качестве «ведущего» в сети Microlan использовался ПК на базе процессора Pentium 120 с контроллером DS9097U под управлением ОС Windows 98. В качестве базового языка реализации алгоритмов использовался высокоуровневый язык Java (SDK 1.2.1) с библиотеками, реализующими API microlan.

Экспериментальная установка состоит из сушильной камеры рис. 1, внутри которой находится стальная дежа и рукавные фильтры. Дежа – стальная емкость в форме усеченного конуса с сетчатым дном в сечении для подачи осушающего агента. Материал загружается в дежу и подсоединяется к воздухопроводу, соединенному с блоками вентилятора и тенов. Осушающий агент предварительно фильтруется и, проходя через блоки вентилятора и тенов, попадает в нижнюю часть дежи, где начинает контактировать с материалом. Нагретый осушающий агент, пройдя через дежу с материалом, отдает часть своей теплоты и насыщается влагой. Далее отработанный агент через рукавные фильтры снова попадает в сушилку через блоки вентилятора и тенов. Для обеспечения движущей силы процесса сушки

(межфазового перехода влаги) часть отработанного агента сбрасывается в открытую среду 10. Приток нового осушающего агента осуществляется через воздухозаборник 11. Блок вентиляторов 8 обеспечивает постоянный поток агента, который необходим для создания условий псевдооживления материала.

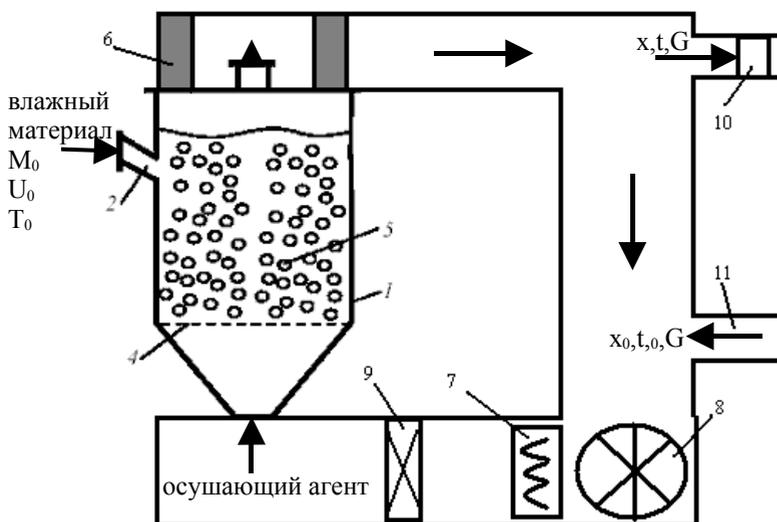


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки на основе периодической сушилки с псевдооживленным слоем:

1 – сушильная камера; 2 – патрубок для ввода материала; 4 – решетка; 5 – псевдооживленный (кипящий) слой; 6 – рукавный фильтр; 7 – нагревательные тены; 8 – вентилятор; 9 – воздушная заслонка; 10 – вытяжка; 11 – воздухозаборник.

В процессе сушки измеряли температуру и влажность осушающего агента на выходе из сушильной камеры. Температурный режим сушки не менялся на протяжении всего процесса. Необходимая скорость агента для создания условий псевдооживления подбиралась эмпирически и составляла 20-35 м/с. Скорость осушающего агента измерялась ротаметром в воздуховоде перед сушильной камерой. Отработанный агент выводился во внешнюю среду из камеры в объеме  $400 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Забор осушающего агента производился из помещения.

Датчики мониторинга воздушной среды, фиксировавшие параметры отработанного агента, были размещены в воздуховоде после фильтров, где вероятность контакта с материалом и влагой минимальна рис. 2. Мониторинг параметров осушающего агента на входе в сушилку не производился, так как его температура и влажность в процессе сушки менялась незначительно. Параметры осушающего агента на входе в сушилку фиксировались однократно перед сушкой. В качестве осушающего агента (теплоносителя) использовался воздух при

температуре 20 °С и влажности 45-55%. Влагосодержание осушающего агента по диаграмме влажного воздуха составило 0.0045 (кг/кг).

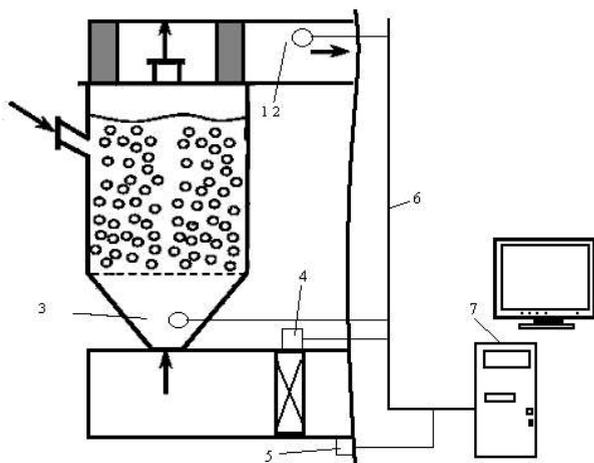


Рис. 2. Блок-схема автоматизированного комплекса контроля технологических параметров в сушилке:

1 – датчик температуры; 2 – датчик влажности; 3 – датчик скорости воздушного потока; 4,5 – электронные ключи; 6 – сеть microlan; 7 – ПК.

Процесс сушки занимал от 40 до 60 минут в зависимости от массы материала и его состава. Интервал опроса датчиков был подобран эмпирически. Ввиду инертности процесса сушки данный интервал составил 3-20 секунд. Все данные, полученные в ходе экспериментов, сохранялись программой в базе данных ЭВМ для последующей обработки.

В экспериментах использовались смеси следующих материалов, применяемых в производстве биологически активных добавок:

1. микрокристаллическая целлюлоза МКЦ (60%), лактоза (15%), глюкоза (15%), черника (10%);
2. ламинария;
3. микрокристаллическая целлюлоза МКЦ (90%), лактоза (5%), рябина (5%).

Форма материала - гранулированные частицы цилиндрической формы размером до 2 мм.

На основе построенной модели процесса сушки был разработан алгоритм расчета параметров материала по состоянию осушающего агента рис. 3.

Константы скорости сушки в первом периоде сушки были рассчитаны по выражению

$$N_1 = \frac{\beta(C_m - C_c)}{\rho_m R_v}$$

где  $\beta$  – коэффициент массопередачи, (м/с);  $\rho_m$  – плотность сухого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $R_v$  – приведенный размер тела, м;  $C_m$  и  $C_c$  – концентрация водяных паров у поверхности материала и в ядре потока.

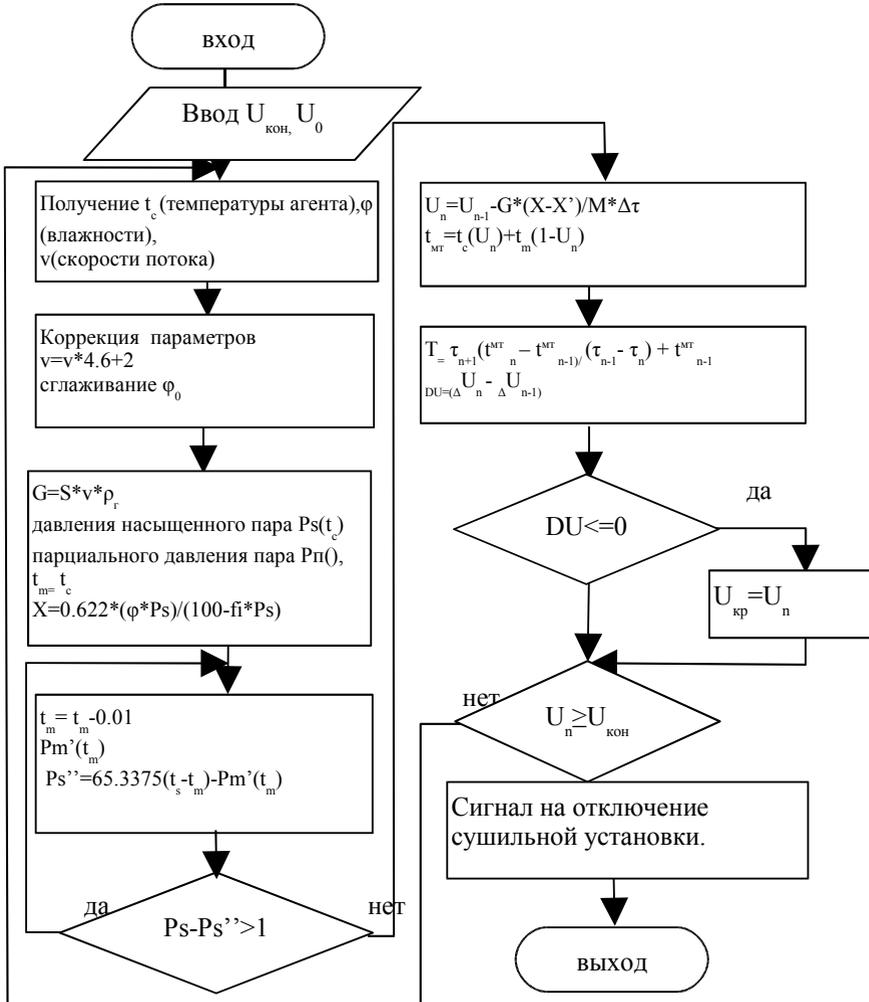


Рис. 3. Алгоритм расчета параметров материала по состоянию осушающего агента:

$U_0$  – начальное влагосодержание материала;  $U_{кон}$  – конечное влагосодержание материала;  $U_{кр}$  – критическое влагосодержание;  $U_n$  – влагосодержание материала  $\rho$  – плотность осушающего агента;  $v$  – скорость осушающего агента;  $S$  – диаметр воздуховода;  $X$  – влагосодержание отработанного агента;  $X'$  – начальное влагосодержание агента.

Константы скорости сушки во втором периоде сушки определяли по методу А.В.Лыкова с использованием приведенной критической влажности  $U_{кр.пр.}$

$$N_2 = (U_{кр} - U_c) K ,$$

где  $U_{кр}$  – критическое приведенное влагосодержание;  $U_p$  – равновесное влагосодержание;  $K$  – коэффициент пропорциональности.

Для подтверждения достоверности построенной модели сушки производились прямые измерения влажности продукта.

Влажность материала в процессе сушки определялась по ГОСТ 1936-85 и ГФ-ХІ (2 часть, стр. 285-286). В определенные моменты времени производился отбор материала из сушилки и его взвешивание. Убыль массы материала фиксировалась весами типа ВНЦ-2.

По массе влажного материала и известной массе сухого продукта, можно рассчитать его влагосодержание:

$$U = \frac{M_{вл}}{M_{т\epsilon}} = \frac{M_k}{M_{тв}} - 1 ,$$

где  $M_{вл}$  – масса влаги в материале;  $M_{тв}$  – масса сухого материала;  $M_k$  – измеренная масса в процессе сушки или абсолютную влажность материала

$$U = \left( \frac{M_k}{M_{тв}} - 1 \right) * 100 .$$

Согласно ТУ на производство пищевых добавок, конечная влажность материала должна составлять 5 - 7%. Конечная масса, до которой производится сушка, рассчитывается следующим образом:

$$M_{кон} = M_{тв} \left( \frac{U_{кон}}{100} + 1 \right) ,$$

где  $U_{кон} = 5-7\%$  – конечное влагосодержание материала.

По полученным в ходе эксперимента данным строились кривые сушки  $U=f(\tau)$  для материалов, участвующих в эксперименте.

Кривые скорости сушки  $dU/d\tau=f(U)$  строились по точкам, полученным путем дискретного дифференцирования функции  $U=f(\tau)$  с использованием специального программного обеспечения.

**В четвертой главе** «Моделирование процесса в псевдооживленном слое» получены уравнения взаимосвязи кинетических характеристик процесса путем при-

менения регрессионного анализа. Рассмотрены экономические аспекты внедрения системы мониторинга и контроля на производстве.

По результатам экспериментальной работы были определены начальные и конечные параметры процесса сушки, произведена оценка исследуемых параметров.

На основе экспериментальных данных был произведен расчет параметров процесса сушки. Произведена оценка разработанной математической модели и осуществлен сравнительный анализ ее с экспериментальными данными.

В ходе экспериментов был получен набор параметрических данных процесса сушки рис. 4. Для получения осредненных значений температуры и влажности осушающего агента использовался метод “скользящего среднего”.



Рис. 4. Кривые температуры, влажности осушающего агента и кривая сушки материала.

В результате обработки экспериментальных данных были получены обобщенные кривые влажности и температуры осушающего агента, а также влагосодержания материала рис. 5 и рис. 6.

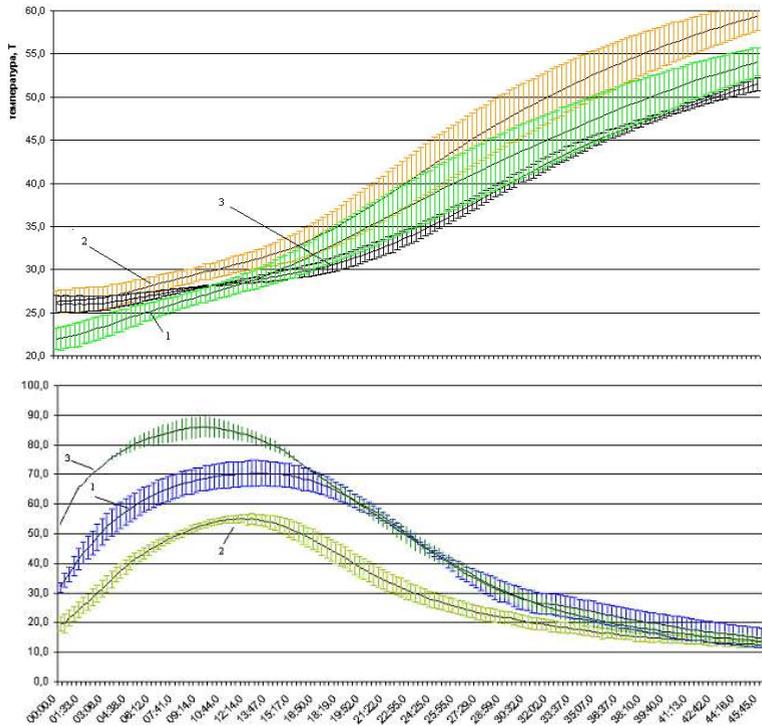


Рис. 5. Обобщенные кривые относительной влажности и температуры агента:  
 1- материал 1; 2 - материал 2; 3 - материал 3.

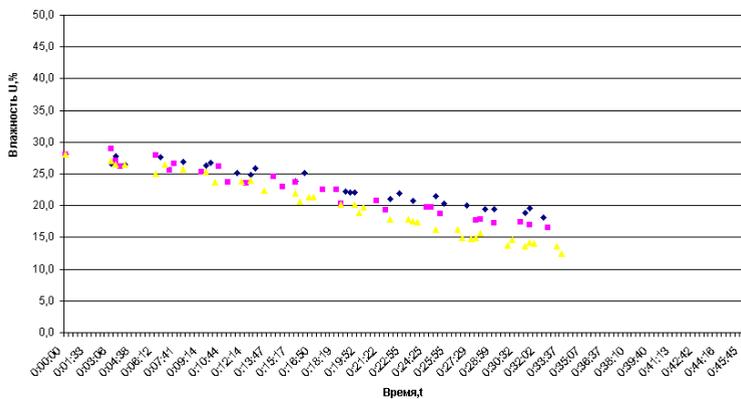


Рис. 6. Обобщенные данные сушки материалов: ■ материал 1; ◇ материал 2; ▲ материал 3.

Используя математическое описание процесса сушки, по экспериментальным данным мы рассчитали параметры материала (рис.7).

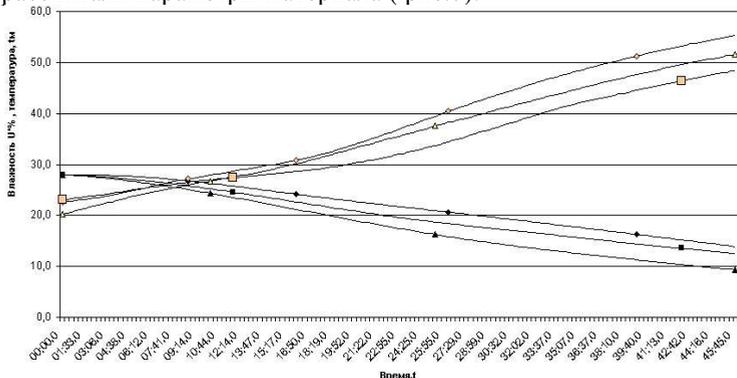


Рис. 7. Расчетные кривые температуры и влажности материалов: ■ материал 1; ◇ материал 2; ▲ материал 3.

Для проверки гипотезы о равенстве средних значений использовался t-критерий для  $\alpha=0.95$ , гипотеза подтвердилась. Полученные кривые влажности материала согласуются с результатами исследований других авторов. Таким образом, можно говорить, что построенная модель процесса сушки материала по параметрам осушающего агента адекватна.

Ввиду особенностей процесса сушки с рециркуляцией, разность между температурой материала и осушающего агента не должна превышать 2-4 °C, что подтвердилось результатами расчетов.

На основе анализа кривых сушки и скорости сушки (рис. 8) рассчитывались коэффициенты скорости процесса в первом и втором периодах.

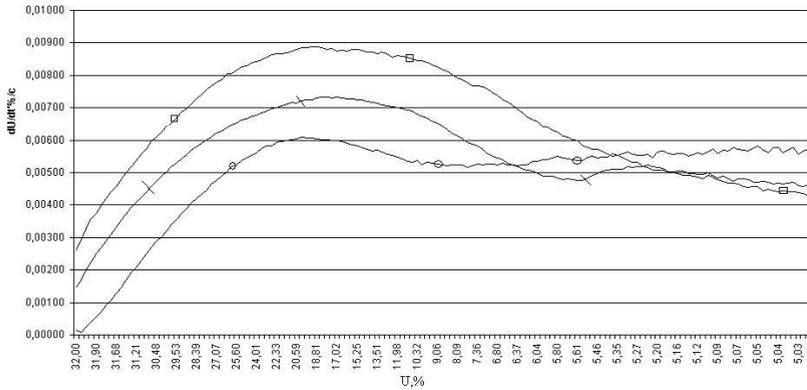


Рис. 8. Кривые скорости сушки  $dU/d\tau=f(U)$  :+ материал 1; ⊕ материал 2; ⊞ материал 3.

Как видно из полученных данных, материалы имеют схожие виды связи с влагой, тем не менее, материал 2 имеет большее массообменное сопротивление, чем материалы 1 и 3.

Во втором периоде сушки снижение скорости удаления влаги из материала происходит по экспоненциальному закону, причем кривые своей выпуклостью обращены в сторону оси абсцисс. Такой характер кривых скорости сушки соответствует по классификации влажных материалов (по А.В.Лыкову) материалам 2-го типа (капиллярно-пористые). Температура материала во всех случаях является монотонно возрастающей функцией.

В исследовании произведен сравнительный анализ экспериментально полученных констант скорости сушки в первом периоде и теоретически рассчитанных коэффициентов внешнего влагопереноса. Коэффициент массоотдачи в первом периоде сушки зависит от скорости сушильного агента, его температуры, а также от условий обтекания поверхности воздухом (форма и размеры поверхности), т.е. характеризуется влагообменным критерием  $Nu$ .

Для выявления параметров, наиболее полно отражающих динамику и кинетику процесса, необходимо оценить меру связи между параметрами осушающего агента и материала.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между параметрами осушающего агента и материала

параметры газа материала	$\varphi, \%$	$X, \text{кг/кг}$	$t_c, ^\circ\text{C}$	$t_m, ^\circ\text{C}$
$U_{..}, \%$	<b>0.63.0.9.0.66</b>	<b>-0.18.0.02.-0.56</b>	<b>-0.94.-0.99.-0.96</b>	<b>-0.73.-0.7.-0.86</b>
$U_{..}, \%$		<b>0.08.0.31.-0.59</b>	<b>-0.96.-0.98.-0.97</b>	<b>-0.84.-0.75.-0.92</b>
$dU/d\tau_{..} \text{ %/c}$	<b>0.9.0.88.0.96</b>	<b>0.99. 0.99.0.99</b>	<b>-0.3.0.-0.42.-0.53</b>	<b>0.41.0.34.0.85</b>

Температура осушающего агента имеет значительную линейную зависимость с влажностью материала в процессе сушки рис. 9. Однако использовать данную зависимость затруднительно ввиду того, что термограмма агента зависит от массы влажного материала, степени рециркуляции агента и других факторов.

Как видно из таблицы 1, влагосодержание осушающего агента имеет значительную линейную зависимость со скоростью сушки материала. Таким образом, целесообразно получение аналитического выражения данной зависимости и ее анализ.

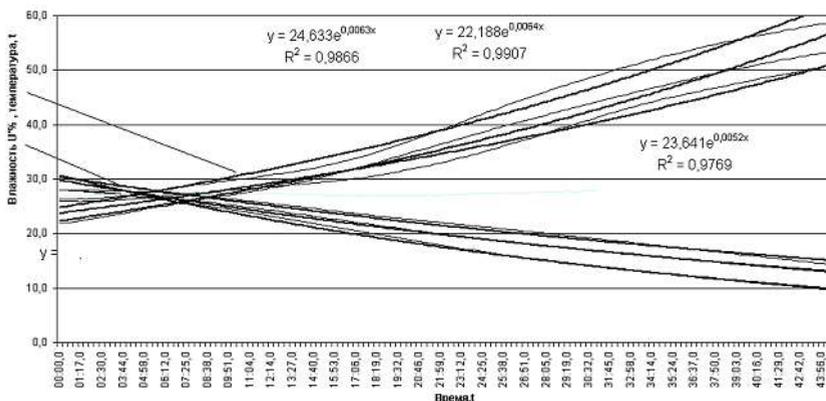


Рис. 9. Аппроксимация термограммы осушающего агента и кривой сушки материала экспоненциальной зависимостью.

Аппроксимация кривой скорости процесса сушки производилась логарифмической зависимостью (9)

$$\frac{dU}{d\tau} = (A \ln(\tau) + D) \quad (9)$$

Обобщенное уравнение, описывающее кинетику сушки исследуемых материалов можно представить в виде:

$$U_k = U_n - \frac{G}{M} (A\tau_k \ln(\tau_k) + B\tau_k) \quad (10)$$

где А и В – константы, зависящие от типа материала; G – массовый расход воздуха, кг/с; М – расход по мокрому материалу,  $\tau \cdot 18$  – время за период, с;  $U_k$  – искомая величина влажности материала,  $U_n$  – начальная величина влажности материала. Для материалов были найдены коэффициенты А и В: А=4.75 В=2.45 (МКЦ3), А=3.4 В=2.459 (МКЦ1), А=2.27 В=5.71 (ламинария).

С целью создания условий для автоматизации процесса сушки были получены обобщенные уравнения взаимосвязи кинетических характеристик процесса.

Компьютерная обработка экспериментальных данных с применением метода регрессионного анализа позволила получить степенную зависимость выходного параметра  $U$  от факторов, влияющих на процесс:

$$U = Ae^{Bt}, \quad (11)$$

где  $U$  – влагосодержание материала,  $A$  и  $B$  – константы, зависящие от типа материала, начального влагосодержания, температуры осушающего агента:

$A=29.41, B=-0.0042$ (МКЦ3);  $A=28.56, B=-0.0049$ (МКЦ1);  $A=30.57, B=-0.0075$  (ламинария).

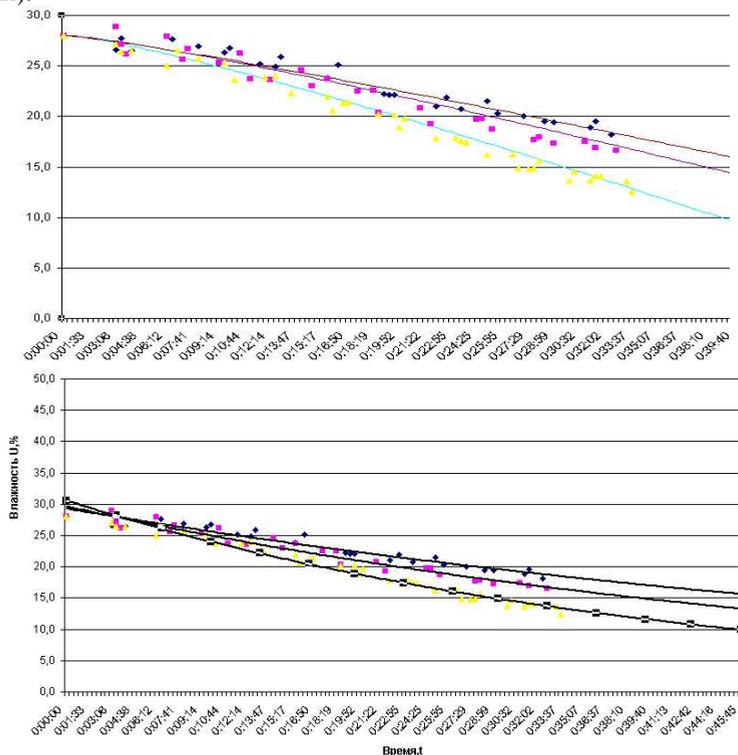


Рис. 10. Экспериментальные и расчетные кривые сушки.

По предложенным кинетическим зависимостям были построены кривые сушки рис.10.

Средние относительные ошибки аппроксимации первой и второй модели не превышают 7%. Зависимость (10) удобнее использовать при расчете процесса, т.к. параметры процесса входят в уравнение в явном виде и данную зависимость достаточно легко интегрировать в систему контроля параметров материала в процессе сушки.

Полученные уравнение согласуются с математической моделью процесса сушки и рассчитанными коэффициентами скорости сушки.

Расчеты и анализ параметров процесса сушки производились с применением программ MathCAD и Microsoft Excel.

**В заключении** представлены основные выводы и результаты работы, а также задачи, требующие дальнейшего решения.

**В приложения** вынесены исходные тексты программы мониторинга и контроля технологических параметров, экспериментальные кривые параметров процесса и каталог используемых приборов с кратким техническим описанием.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. Определены математические зависимости между температурой и влажностью осушающего агента и материала. Причем термограмма материала с некоторыми допущениями соответствует термограмме осушающего агента на выходе из сушильной камеры;
2. Спроектирована и испытана автоматизированная система мониторинга для исследования параметров процесса сушки;
3. Проведено экспериментальное исследование процесса сушки трех видов таблетсмесей;
4. Предложена математическая модель процесса сушки, связывающая влажность, температуру агента и влагосодержание материала;
5. Обосновано использование параметра «влагосодержание осушающего агента», зависящего от относительной влажности и температуры осушающего агента. Математическая модель, построенная по кривой влагосодержания, наиболее полно отражает кинетику процесса сушки и может быть применена при различных параметрах процесса сушки;
6. Предложен и реализован алгоритм определения параметров материала по состоянию осушающего агента;
7. Разработан аппаратный комплекс мониторинга и контроля технологических параметров процесса сушки;
8. Предполагаемый экономический эффект от внедрения созданного программно-аппаратного комплекса для сушки многокомпонентных фармацевтических смесей в кипящем слое составит более 3 665 000 рублей за десятилетний период.

Основное содержание диссертационного исследования опубликовано в следующих работах:

1. Замятин В.И., Липин А.В. Приборы мониторинга и контроля параметров сушилки-гранулятора в псевдооживленном слое// Материалы третьей

- международной научно-технической конференции “ИКИ-2002”.- Барнаул:Изд. Азбука, 2002. – 38 с.
2. Замятин В.И., Липин А.В. Использование технологии MicroLAn при автоматизации сушилки-гранулятора в псевдоожигенном слое//Ползуновский вестник. - Барнаул:Издательство АлтГТУ, 2002. – N1. – с. 149–153.
  3. Замятин В.И., Липин А.В. Проблемы разработки программно-аппаратного комплекса для установки гранулирования и сушки// Материалы третьей международной научно-технической конференции “ИКИ-2003”. - Барнаул:Изд. Азбука, 2003. – с. 39–40.
  4. Замятин В.И., Липин А.В. Автоматизированная система управления технологическими параметрами сушилки в псевдоожигенном слое// Материалы международной научно-технической конференции “ИКИ-2003”.-Барнаул:Изд. АлтГТУ, 2003. – с. 96–97.
  5. Замятин В.И., Липин А.В. Кинетика сушки микрокристаллической целлюлозы в псевдоожигенном слое // Вестник Алтайского государственного технического университета. Приложение к изданию «Ползуновский альманах» // Алт. Гос. Тех. Ун-т им И.И.Ползунова.- Барнаул:Издательство АлтГТУ, 2006. – с. 83–84.
  6. Замятин В.И., Липин А.В. Комплекс приборов одно проводной сети microlan для мониторинга сушилок с псевдоожигенным слоем // Вестник Алтайского государственного технического университета. Приложение к изданию «Ползуновский альманах» // Алт. Гос. Тех. Ун-т им И.И.Ползунова.-Барнаул:Издательство АлтГТУ, 2006. – с. 79-82.
  7. Замятин В.И., Липин А.В. Анализ кинетики конвективной сушки гранулированной микрокристаллической целлюлозы в установках с псевдоожигенным слоем// Вестник Алтайского государственного технического университета. Приложение к изданию «Ползуновский альманах» // Алт. Гос. Тех. Ун-т им И.И.Ползунова.- Барнаул:Издательство АлтГТУ, 2006. – с. 85–88.
  8. Липин А.В. Интеллектуальная система обработки информации в сушильных установках кипящего слоя // Ползуновский альманах. – 2006. – N4. – с. 47–48.