

Автореф
Х198

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

М. А. ХУСИД

Февраль 1970

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРОВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ
СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПИЩЕВОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ЦЕЛЬЮ ИХ
АВТОМАТИЗАЦИИ

(05.198 - Автоматизация производственных
процессов пищевой промышленности)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса, 1970 г.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

М. А. ХУСИД

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРОВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ
СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПИЩЕВОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ЦЕЛЮ ИХ
АВТОМАТИЗАЦИИ

(05.198 - Автоматизация производственных
процессов пищевой промышленности)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

К. Б. 11595 ✓

Одесский технологический
институт
им. М. В. Ломоносова

БИБЛИОТЕКА

Одесса, 1970 г.

ОНАХТ 23.05.12
Исследование паровых



v011595

Автореф v011595
X98 Хусид М.А.

Исследование паровых
сушильных установок
1970

12

Работа выполнена во Всесоюзном проектно-конструкторском и научно-исследовательском институте автоматизации пищевой промышленности "Пищепромавтоматика".

Научный руководитель -

доктор технических наук, профессор *П. Н. Платонов*

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор *С. М. Смирнов*,

кандидат технических наук, доцент *М. А. Гришин*

Ведущее предприятие - Всесоюзный научно-исследовательский институт консервной и овощесушильной промышленности.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1970 г.

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1970 г.

на заседании Совета Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В. Ломоносова.

Просим Ваши отзывы в двух экземплярах присылать по адресу: г. Одесса-39, ул. Свердлова, 112, Технологический институт пищевой промышленности имени М.В. Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета

Л. А. Запорожец

ВВЕДЕНИЕ

Коммунистическая партия и Советское правительство, постоянно заботясь о росте производительных сил и высоких темпах развития общественного производства, большое внимание уделяет удовлетворению материальных и духовных запросов советских людей. Одна из важнейших задач в области повышения благосостояния нашего народа - увеличение валовой продукции и расширения ассортимента пищевой промышленности, в том числе пищевого концентрата и овощесушильной, вырабатывающих ежегодно десятки тысяч тонн пищевых концентратов, сушеного картофеля и овощей, которые предназначаются в основном для снабжения населения отдаленных районов страны, снабжения различных экспедиций и для создания государственного резерва.

В настоящее время пищевые концентраты и овощесушильные предприятия оснащены преимущественно четырех- и пятиленточными паровыми конвейерными сушилками различной производительности.

На этих предприятиях процесс сушки является важнейшим технологическим процессом, определяющим как качество выпускаемого продукта, так и экономические показатели производства. Поэтому, что осуществление оптимального управления сушильными установками представляет несомненный интерес как в экономическом, так и в научно-техническом отношении.

Одним из основных показателей качества сушеных продуктов является их устойчивость при хранении. Она в значительной степени определяется конечной влажностью материала.

Уменьшение конечной влажности продукта дает повышение гарантии его устойчивости при хранении. Однако, при прочих равных условиях, оно снижает технико-экономические показатели производства: увеличивает расход энергоносителя, уменьшает производительность установки, увеличивает удельный расход сырья.

Следовательно, процесс сушки должен быть организован таким образом, чтобы достигалась максимально возможная конечная влажность материала.

Поскольку в паровых конвейерных сушилках процесс сушки проходит в нескольких последовательно расположенных зонах (по числу конвейерных лент), каждая из которых характеризуется многими величинами, то достижение максимально допустимой конечной влажности материала может быть обеспечено при различных вариантах сочетания значений этих переменных.

В этих условиях целью управления процессом сушки является достижение наиболее выгодного варианта по какому-либо критерию, например, по максимальной производительности, минимальным затратам и др.

Разработка оптимальных режимов работы паровых конвейерных сушилок является частью общей задачи управления.

Второй, не менее важной, является задача создания системы автоматического регулирования (САР), способной поддерживать заданный режим в процессе работы установки, в условиях действия внешних и внутренних возмущений.

В последние годы созданию средств и систем автоматизации паровых конвейерных сушилок уделяли большое внимание ряд отечественных и зарубежных организаций (Всесоюзный научно-исследовательский институт консервной и овощесушильной промышленности, Белорусский научно-исследовательский институт промышленности продовольственных товаров, Центральный научно-исследовательский институт пищевой промышленности г.Будапешт, СКБ Проектирибор г.Кутаиси и др.).

Предложенные САР представляют пеструю картину в части использования различных законов регулирования, принципов управления и средств автоматизации. Общий недостаток этих САР - слабая увязка принципов управления и законов регулирования с технологическими основами процесса сушки и динамическими свойствами паровых конвейерных сушилок.

В связи с этим назрела необходимость проведения исследований, связанных с комплексным изучением основных закономерностей процесса тепло- и массообмена в движущемся плотном слое материала и процесса теплообмена в паровом калорифере, необходимых для обоснованного выбора оптимальных режимов процесса сушки в паровых конвейерных сушилках, а также для разработки САР указанных установок.

Ниже перечислены основные задачи исследований.

1. Разработка математического описания паровых конвейерных сушилок при стационарном режиме работы на основе модели, учитывающей кинетику процесса сушки в движущемся плотном слое материала, кинетику нагрева материала в процессе сушки и процесс теплообмена в паровом калорифере.

Изучение особенностей статических характеристик объекта.

2. Разработка математического описания паровых конвейерных сушилок при нестационарном режиме работы, устанавливающего зависимость изменения регулируемых параметров (температуры сушильного агента, влажности материала) от возмущающих и регулирующих воздействий. Изучение особенностей динамических характеристик объекта и их зависимости от режима работы установки и места расположения датчиков.

3. Исследование и обоснование выбора структурной схемы автоматизации и законов регулирования основных параметров процесса сушки в паровых конвейерных сушилках.

Работа выполнена в институте "Пищепромавтоматика". Экспериментальные исследования и производственные испытания проводились на Одесском комбинате пищевых концентратов, Серпуховском комбинате пищевых концентратов, Надригайловском овощесушильном заводе.

Работа содержит 131 страницу текста, 46 рисунков, 9 таблиц и 5 приложений.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРОВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ СУШИЛОК С ЦЕЛЬЮ ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ

В первой главе анализируется работа паровых конвейерных сушилок в производственных условиях.

Показано, что в относительно короткие промежутки времени (до 10 час.) происходят значительные изменения влажности готового

продукта, температуры сушильного агента и температуры материала. Это предопределяет низкое качество выпускаемой продукции и снижает производительность установок. Обосновывается технико-экономическая целесообразность разработки системы автоматического управления процессом сушки в паровых конвейерных сушилках.

Далее излагается постановка и математическая формулировка задач оптимального управления и оптимального проектирования указанных установок.

Показано, что научной основой решения поставленных задач является математическое описание процесса сушки в рассматриваемых сушилках при стационарном и переходном режимах работы.

Приведен обзор литературных источников, посвященных математическому описанию сушильных установок пищевой, легкой, химической, зерноперерабатывающей и др. отраслей промышленности.

Из обзора следует, что вопросы математического описания паровых конвейерных сушилок до настоящего времени в литературе не освещены.

Дана общая методика проведения исследований, проанализированы методы получения математических описаний сушильных установок, приведены обзор литературы по исследованию процессов тепло- и массообмена и по исследованию паровых калориферов.

Обзор включает 79 литературных источников.

Сформулированы задачи исследований и приведены общие результаты работы.

П. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПАРОВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ СУШИЛОК ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Рассматриваемые сушильные установки (СУ) состоят из 4-х или 5-и конвейерных лент с встроенными паровыми калориферами. Материал последовательно проходит все конвейерные ленты. Грейный пар подается обособленно в каждый калорифер, снабженный конденсатоотводчиком.

Воздух продувается через СУ нагнетающими и отсасывающими вентиляторами.

СУ разбита на четыре зоны. Каждая зона включает одну конвейерную ленту с сушим материалом и паровой калорифер.

Величины, характеризующие состояние зоны, условно разделены на следующие основные группы:

1. Возмущающие воздействия – влажность и температура материала при входе в зону (W'' , t''), температура и влагосодержание воздуха при входе в зону (t_b'' , d''), давление пара в магистрали (P_n), физико-химические свойства сушеного материала (φ).
2. Выходные параметры – влажность и температура материала при выходе из зоны (W^k , t^k), температура и влагосодержание воздуха при выходе из зоны (t_b^k , d^k), производительность зоны по выпаренной влаге (W'), расход пара ($\mathcal{D}$).
3. Регулирующие воздействия – количество материала, подаваемого на сушку (G), степень открытия регулирующего клапана подачи пара (n), скорость движения конвейерной ленты (v_b) и скорость движения воздуха (v_b).

На рис. I показана схема взаимосвязи основных величин, характеризующих работу зоны.

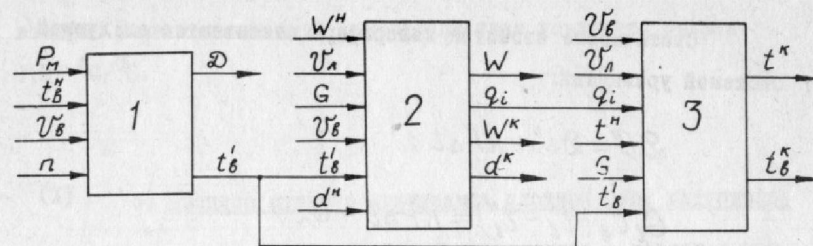


Рис. 1

В каждой зоне рассматривается три взаимосвязанных процесса: процесс теплообмена в паровом калорифере (1), процесс сушки в движущемся плотном слое материала (2) и процесс конвективного теплообмена в движущемся плотном слое материала при наличии внутреннего источника тепла переменной интенсивности (для периода падающей скорости сушки) (3).

а) Процесс теплообмена в паровом калорифере

В основу описания процесса положены уравнения теплового баланса.

Показано, что в условиях работы СУ приемлемы следующие допущения: в паровом пространстве калорифера греющий пар находится в состоянии насыщения; отсутствует перепад давления пара по длине калорифера; отсутствует лучистый теплообмен между калорифером и другими конструктивными элементами СУ.

Статические свойства калорифера описываются следующей системой уравнений:

$$\partial i'' = \partial i' + \kappa F \partial t;$$

$$G_g C_g (t'_g - t''_g) = \kappa F \partial t - Q_n; \quad (I)$$

$$\partial = 0,51 F_{max} n \alpha \varepsilon \sqrt{\gamma_n} \sqrt{P_n - P}$$

Коэффициент теплопередачи определялся расчётным путем и проверялся по экспериментальным данным.

Показано, что с достаточной для практического использования точностью коэффициент теплопередачи можно вычислить по формуле:

$$K = 13,2 \nu_g^{0,5} \quad (2)$$

Анализ статических характеристик калорифера позволил сделать следующие выводы:

- к существенным возмущениям, приводящим к значительному изменению температуры воздуха, следует отнести начальную температуру воздуха и степень открытия регулирующего клапана;
- при стабилизации давления пара в магистрали с точностью $\pm 0,98 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ (1 кг/см²) от номинального значения изменение температуры горячего воздуха не превосходит $\pm 3^\circ\text{C}$, следовательно, такое возмущение можно признать несущественным;
- характеристики калорифера при возмущениях со стороны скорости движения воздуха и степени открытия регулирующего клапана имеют ярко выраженный нелинейный характер;

- характеристика калорифера при возмущении начальной температурой воздуха близка к линейной с коэффициентом усиления, равным $0,87^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$.

б) Процесс сушки в движущемся плотном слое материала.

В основу математического описания процесса в период падающей скорости сушки положено известное уравнение кинетики сушки, предложенное А.В. Лыковым.

Для случая движущегося слоя материала, при начальной влажности $W|_{y=0} = W''$ решение этого уравнения имеет вид:

$$W = W_p + (W'' - W_p) e^{-\frac{K_c}{u_n} y} \quad (3)$$

Для практического использования формулы (3) необходимо располагать численным значением K_c , который зависит от свойств сушеного материала и режима сушки.

Путем обобщения экспериментальных данных, полученных рядом авторов при исследовании кинетики сушки круп и овощей, показано, что для определения K_c можно пользоваться аналогом формулы

Кугана-Лыкова:

$$K_c = C \frac{(\gamma \nu_g)^n}{\left(\frac{M_c}{F}\right)^m} (\Delta d_n)^2 \quad (4)$$

Определены численные значения коэффициентов C, n, m, q для некоторых материалов (табл. I).

Таблица I

М а т е р и а л	Значения коэффициентов			
	C	n	m	q
Гречневая крупа	2,33	0,151	0,612	0,5
Парловая крупа	1,187	0,138	0,617	0,73
Картофель	0,051	0,571	0,128	1,12
Морковь	0,055	0,588	0,167	1,11

Получено выражение для определения интенсивности внутреннего источника тепла:

$$q_i = - \frac{\gamma_c \gamma_{Kc}}{100} (W^H - W_p) e^{-\frac{K_c}{U_0} y} \quad (5)$$

Значение γ_c определяется через насыпную массу влажного материала:

$$\gamma_c = \frac{100 \gamma_H}{100 + W} \quad (6)$$

Зависимость насыпной массы от влажности материала определялась экспериментально, методом регрессивного анализа.

Показано, что с точностью до 10% эта зависимость описывается уравнениями:

а) для моркови, нарезанной столбиками:

$$\gamma_H = 0,115 + 0,125 \cdot 10^{-2} W - 0,9 \cdot 10^{-6} W^2; \quad (7)$$

б) для лука, нарезанного кружочками:

$$\gamma_H = 0,055 + 0,09 \cdot 10^{-2} W - 0,7 \cdot 10^{-6} W^2; \quad (8)$$

в) для картофеля, нарезанного кубиками:

$$\gamma_H = 0,293 + 0,09 \cdot 10^{-2} W; \quad (9)$$

г) для гречневой крупы:

$$\gamma_H = 0,867 - 0,17 \cdot 10^{-2} W; \quad (10)$$

д) для парловой крупы:

$$\gamma_H = 0,845 - 0,45 \cdot 10^{-2} W. \quad (11)$$

Используя выведенные формулы, были рассчитаны статистические характеристики, связывающие конечную влажность материала с входными величинами.

Анализ статистических характеристик показал, что в рассматриваемом диапазоне изменения входных величин:

- при сушке круп и овощей изменение влажности материала на входе конвейерной ленты приводит к значительному изменению влажности материала на выходе ленты;
- изменение равновесной влажности незначительно сказывается на величине конечной влажности материала;
- при сушке овощей изменение коэффициента сушки существенно влияет на величину конечной влажности материала II, III и IV лент, связь эта близка к линейной; для V ленты эта связь несущественна;

- при сушке круп связь между изменением коэффициента сушки и изменением конечной влажности материала значительно слабее и носит практически линейный характер;
- очень большое влияние на величину конечной влажности материала оказывает изменение скорости движения конвейерных лент; следует отметить существенно нелинейный характер рассматриваемой связи.

в) Процесс конвективного теплообмена в движущемся плотном слое материала

Работами Г.Д.Рабиновича показано, что задачи по теплообмену в неподвижном плотном слое мелкодисперсного материала могут быть, при определенных условиях, сведены к решению задач о теплообмене в рекуперативном аппарате с использованием соответствующих дифференциальных уравнений.

В работе указанная методика использована для исследования процесса теплообмена в движущемся плотном слое материала при наличии внутреннего отрицательного источника тепла переменной интенсивности.

При выводе дифференциальных уравнений теплообмена сделаны следующие основные допущения:

- температурный градиент внутри каждой частицы отсутствует;
- количество тепла, передаваемого частицами друг другу в направлении движения потока теплоносителя, пренебрежимо мало по сравнению с количеством тепла, которым обмениваются частицы с протекающим через слой теплоносителем;

- физические параметры паровоздушной смеси и сушеного материала в процессе теплообмена остаются постоянными.

Если материал движется в направлении оси y , а теплоноситель - в направлении оси x , уравнения теплообмена записываются следующим образом:

$$q_i + q_n = c_3 \delta_3 v_y \frac{\partial t_3}{\partial y}; \quad (12)$$

$$q_n' = c_6 \delta_6 v_6 \frac{\partial t_6}{\partial x}$$

Граничные условия для этих уравнений очевидны:

$$t_3(x) \Big|_{y=0} = t_3''; \quad (13)$$

$$t_6(y) \Big|_{x=0} = t_6'$$

Решение уравнений (12) проведено методом интегрального преобразования Лапласа-Карсона. Выражения для температуры материала и температуры воздуха в безразмерной форме получились в виде:

$$\begin{aligned} \theta_3 &= \frac{\varepsilon}{A} (1 - e^{-A\sqrt{y}}) + e^{-\sqrt{y}x} \left(1 - \frac{\varepsilon}{A}\right) \chi_1 + \frac{\varepsilon}{A} e^{-\sqrt{y}x} \chi_2; \\ \theta_6 &= \frac{\varepsilon}{A} (e^{-A\sqrt{x}} - 1) + e^{-\sqrt{x}y} \left(1 + \frac{\varepsilon}{A}\right) \chi_1' + e^{-\sqrt{x}y} \frac{(A-1)\varepsilon}{A} \chi_2'. \end{aligned} \quad (14)$$

Где:

$$\theta_3 = \frac{t_3 - t_3''}{t_6' - t_3''};$$

$$\theta_6 = \frac{t_6 - t_6'}{t_3'' - t_6'};$$

$$\sqrt{y} = \frac{\alpha y}{\delta_3 c_3 t_3 v_y};$$

$$v_x = \frac{\alpha x}{\delta_c c_e t_e v_e};$$

$$\varepsilon = \frac{\delta_c \tau (W'' - W_p) K_c t_3}{100 \alpha (t_6' - t_3'')};$$

$$A = \frac{K_c \delta_3 c_3 t_3}{\alpha};$$

$$Z_1 = \int_0^{v_y} e^{-\xi} Y_0(2\sqrt{v_x \xi}) d\xi;$$

$$Z_2 = \int_0^{v_y} e^{-A(v_y - \xi)} e^{-\xi} Y_0(2\sqrt{v_x \xi}) d\xi;$$

$$Z_1' = \int_0^{v_x} e^{-\xi} Y_0(2\sqrt{v_y \xi}) d\xi;$$

$$Z_2' = \int_0^{v_x} e^{-A(v_x - \xi)} e^{-\xi} Y_0(2\sqrt{v_y \xi}) d\xi$$

Используя выведенные соотношения, были получены статические характеристики, связывающие температуру материала и температуру сушильного агента при выходе из слоя с основными входными величинами.

Анализ этих характеристик показал, что в условиях работы паровых конвейерных сушилок температура нагрева материала в основном определяется температурой и скоростью движения воздуха; температура воздуха над слоем материала существенно зависит от влажности материала, поступающего на ленту, толщины слоя материала, скорости движения воздуха и температуры воздуха, подходящего к слою.

В заключение приведены особенности математического описания сушильной установки в периоды прогрева материала и постоянной скорости сушки.

III. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПАРОВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ СУШИЛОК ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Необходимость исследования динамических свойств паровых конвейерных сушилок возникает при решении задач, связанных с разработкой системы автоматического управления процессом сушки.

Основное назначение такой системы — получение требуемого качества сушеного материала, обеспечив при этом необходимую производительность установки, при изменяющихся входных воздействиях, влияющих на процесс сушки.

В работе доказано, что при такой постановке задачи исследования динамических свойств СУ необходимо провести в периоде надающей скорости сушки. Изменение режима в периоде прогрева материала и периоде постоянной скорости сушки можно рассматривать как возмущающие воздействия.

В основу исследований положена схема взаимосвязей основных величин, изображенная на рис. I.

а) Процесс теплообмена в паровом килорифере

При выводе уравнений динамики, учитывая, что рассматривались малые отклонения параметров, были приняты следующие допущения (помимо допущений, принятых при выводе уравнений статики): теплоемкость воздуха не зависит от его температуры; плотность воздуха — величина постоянная; аккумулярующей способностью воздуха можно пренебречь; коэффициенты теплоотдачи не зависят от расхода и температуры пара и воздуха.

Используя уравнения материального и теплового баланса при нестационарном режиме, были получены общие уравнения динамики,

К. В. 41595

описывающие закон изменения во времени температуры воздуха на выходе калорифера при возмущениях со стороны давления пара в магистралах, степени открытия регулирующего клапана, подачи пара в калорифер, температуры воздуха перед калорифером и расхода воздуха.

$$V_n [\beta \delta n_0 + \alpha (U_0 + c_k t_n)] \frac{d(\delta t_n)}{dt} + \left[\alpha_1 F_1 + \alpha_2 c_k + \frac{A_1 n_2 (i'' - c_k t_n)}{2 \sqrt{P_n - P}} \right] \delta t_n = A (i'' - c_k t_n) \sqrt{P_n - P} \delta n + \left[\gamma \delta + \frac{A_1 n_2 (i'' - c_k t_n)}{2 \sqrt{P_n - P}} \right] \delta P_n + \alpha_1 F_1 \delta t_{cm}; \quad (15)$$

$$G_{cm} C_{cm} \frac{d(\delta t_{cm})}{dt} + (\alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2) \delta t_{cm} = \alpha_1 F_1 \delta t_n + \frac{\alpha_2 F_2}{2} \delta t_c'' + \frac{\alpha_2 F_2}{2} \delta t_c';$$

$$\alpha_2 F_2 \left(\delta t_{cm} - \frac{\delta t_c'' + \delta t_c'}{2} \right) = G_c C_c \delta t_c' - G_c C_c \delta t_c'' + c_c (t_c' - t_c'') \delta \theta_c$$

Из системы уравнений (15) были выведены передаточные функции по указанным выше каналам:

$$W_1(p) = \frac{\delta \bar{t}_c'}{\Delta \bar{n}} = \frac{K_1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}; \quad (16)$$

$$W_2(p) = \frac{\delta \bar{t}_c'}{\Delta \bar{P}_n} = \frac{K_2}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}; \quad (17)$$

$$W_3(p) = \frac{\delta \bar{t}_c'}{\Delta \bar{t}_n} = \frac{-a_5 b_1 p^2 + (a_4 b_1 - a_5 b_2) p + a_3 b_1 + a_4 b_2}{a_1 b_1 p^2 + (a_1 b_1 + a_1 b_2) p + a_1 b_2 - a_3 b_1}; \quad (18)$$

$$W_4(p) = \frac{\delta \bar{t}_c'}{\Delta \bar{\theta}_c} = \frac{-a_6 b_1 p^2 - (a_6 b_1 + a_7 b_1) p + a_3 b_1 - a_7 b_2}{a_1 b_1 p^2 + (a_1 b_1 + a_1 b_2) p + a_1 b_2 - a_3 b_1}; \quad (19)$$

В этих формулах коэффициенты усиления, постоянные времени, а также коэффициенты a и b зависят от геометрических размеров калорифера, коэффициентов теплоотдачи и других параметров.

б) Процесс сушки в движущемся плотном слое материала

Исследовалось изменение средней по толщине слоя влажности материала во времени и по длине конвейерной ленты при скачкообразных возмущениях со стороны скорости движения конвейерной ленты, коэффициента сушки и начальной влажности материала.

Показано, что при нестационарном режиме уравнение кинетики сушки имеет вид:

$$-v_d \frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial W}{\partial \tau} = K_c (W - W_p), \quad (20)$$

при начальных и граничных условиях:

$$W|_{\tau=0} = W_p + (W'' - W_p) e^{-\frac{K_{c0}}{v_{d0}} y}; \quad (21)$$

$$W|_{y=0} = W''.$$

Решение уравнения (20) в области $\tau \leq \frac{y}{v_d}$ описывает кривые переходного процесса в любом сечении слоя $y = \text{const}$ при указанных выше возмущениях.

$$W = W_p + (W'' - W_p) e^{-\frac{K_{c0}}{v_{d0}} y} e^{-(K_c - K_{c0} \frac{v_d}{v_{d0}}) \tau} \quad (22)$$

При $\tau \geq \frac{y}{v_d}$ решение уравнения (20) описывает кривую кинетики сушки материала в новом установившемся состоянии.

Решение общего уравнения динамики было положено в основу определения передаточных функций по отдельным каналам входных воздействий.

В работе показано, что по каналам $K_c \rightarrow W$ и $v_d \rightarrow W$ передаточные функции описываются трансцендентными выражениями. Для

удобства моделирования на аналоговых вычислительных машинах и возможности оценки динамических свойств СУ указанные передаточные функции были аппроксимированы передаточными функциями простейших динамических звеньев первого порядка и чистого запаздывания. Введены формулы для определения ошибки аппроксимации.

Аппроксимированные передаточные функции имеют вид:

$$W_5(p) = \frac{\Delta \bar{W}}{\Delta \bar{K}_c} = \begin{cases} \frac{K_3}{T_3 p + 1} & \text{при } K_c > K_{c0}; \\ \frac{K_3 e^{-p\tau_1}}{T_4 p + 1} & \text{при } K_c < K_{c0}; \end{cases} \quad (23)$$

$$W_6(p) = \frac{\Delta \bar{W}}{\Delta \bar{v}_n} = \begin{cases} \frac{K_4}{T_5 p + 1} & \text{при } v_n < v_{n0}; \\ \frac{K_4 e^{-p\tau_2}}{T_6 p + 1} & \text{при } v_n > v_{n0}. \end{cases} \quad (24)$$

При возмущении начальной влажностью материала передаточная функция описывается следующим выражением:

$$W_7(p) = \frac{\Delta \bar{W}}{\Delta \bar{W}''} = K_5 e^{-p\tau_3} \quad (25)$$

В передаточных функциях (23), (24), (25) коэффициенты усиления, постоянные времени и запаздывания зависят от места отбора импульса, начального и конечного режима сушки. В работе выведены формулы для определения указанных величин.

в) Процесс конвективного теплообмена в движущемся плотном слое материала

Процесс нестационарного конвективного теплообмена в движущемся плотном слое материала при наличии внутреннего отрицательного

источника тепла переменной интенсивности описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{\alpha}{\delta_3 c_3 t_3} (t_6 - t_3) + \frac{q_c}{\delta_3 c_3} = \frac{\partial t_3}{\partial \tau} + v_3 \frac{\partial t_3}{\partial y}; \quad (26)$$

$$\frac{\alpha}{\delta_6 c_6 t_6} (t_3 - t_6) = \frac{\partial t_6}{\partial \tau} + v_6 \frac{\partial t_6}{\partial x}$$

Начальные условия: $t_3(x, y)|_{\tau=0} = t_{30}(x, y)$ и $t_6(x, y)|_{\tau=0} = t_{60}(x, y)$ представляют собой решение уравнений стационарного теплообмена, приведенные ранее.

Граничные условия задаются из условий скачкообразного изменения температуры воздуха при входе в слой материала и температуры материала, поступающего на сушку:

$$t_6(y, \tau)|_{x=0} = t_6' = \text{const};$$

$$t_3(x, \tau)|_{y=0} = t_3'' = \text{const},$$

где t_6' и t_3'' — новые возмущенные значения температуры воздуха и материала.

В работе получено аналитическое решение уравнений (26)

В заключении данной главы описано экспериментальное определение динамических характеристик паровых конвейерных сушилок.

В работе обосновано применение метода пассивного статистического эксперимента, приведена схема оснащения СУ измерительными приборами, дана характеристика приборов.

Обработка статистических данных проводилась на аналоговых и цифровых вычислительных машинах.

Получение передаточных функций линейных каналов (калорифера) проводилось с помощью определения авто- и взаимокорреляционных функций соответствующих входов и выходов с последующим определением импульсной переходной функции путем решения интегрального уравнения свертки.

Данная методика не могла быть применена для исследования нелинейных каналов, передаточные функции которых описывают нестационарный процесс сушки в плотном слое материала. В связи с этим на аналоговых вычислительных машинах была реализована модель нестационарного процесса сушки в виде передаточных функций, полученных при аналитическом исследовании.

На входы модели заводились возмущающие воздействия в виде случайных процессов, реализации которых были получены при экспериментальных исследованиях. Затем сравнивались процессы изменения конечной влажности материала, полученные на модели и на объекте.

Степень близости этих процессов оценивалась по их математическим ожиданиям и дисперсиям.

Разность математических ожиданий и дисперсий минимизировалась путем изменения коэффициентов передаточных функций.

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показало, что разность между расчетными и экспериментальными значениями параметров передаточных функций не превышает 15% от сравниваемых величин.

IV. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРОВЫМИ КОНВЕЙЕРНЫМИ СУШИЛКАМИ

Четвертая глава посвящена синтезу системы автоматического управления паровыми конвейерными сушилками типов КСА-80 и ПКС-90.

Выбор данных СУ обоснован их наибольшей производительностью (среди рассматриваемой группы сушилок) и широким распространением при производстве сушеных овощей и пищевых концентратов.

Проведен анализ работы СУ в производственных условиях с целью определения возмущений, существенно изменяющих режим работы установки и величину конечной влажности материала, а также для предварительного выбора структурных схем автоматического управления.

Показано, что спектральная плотность изменений конечной влажности материала содержит широкий спектр частот, значительно перекрывающий полосу пропускания объекта по всем каналам возможных регулирующих воздействий. Вследствие этого назначения системы автоматического управления может состоять только в стабилизации некоторого среднего значения конечной влажности материала, вычисленного за определенный промежуток времени.

В работе показаны источники высокочастотных составляющих изменения конечной влажности материала, намечены основные пути их устранения.

Анализ действующих возмущений проведен в спектре частот, соответствующем полосе пропускания рассматриваемых каналов.

Одновременно был проведен анализ возможности компенсации действующих возмущений. При этом в качестве регулирующих воздействий рассматривались изменение коэффициента сушки путем изменения температуры сушильного агента и изменение экспозиции сушки путем изменения скорости движения конвейерных лент сушилки.

Для примера в таблице 2 представлены результаты анализа, проведенного для сушилки типа ПКС-90 при сушке моркови:

Аналогично были рассмотрены процессы сушки других материалов (лука, картофеля, перловой крупы, гречневой крупы, риса, пшеничного гороха).

Анализ действующих возмущений с учетом конструктивных особенностей СУ типов КСА-80 и ПКС-90, позволил сделать следующие выводы:

1. При сушке овощей и картофеля в сушилках типа ПКС-90 изменения влажности готового продукта вызываются в основном изменением влажности материала, поступающего на ленты, изменением температуры сушильного агента и изменением толщины слоя материала. Возмущение, вызванное изменением влагосодержания воздуха, можно признать несущественным. Действующие возмущения могут быть скомпенсированы только изменением экспозиции сушки, т.е. изменением скорости движения конвейерных лент сушилки.
2. При сушке круп в сушилке типа КСА-80 основными возмущениями, приводящими к значительному изменению конечной влажности материала, являются изменение начальной влажности материала и изменение температуры сушильного агента. Возмущения со стороны толщины слоя материала и влагосодержания воздуха можно считать несущественными.

Таблица 2

К анализу действующих возмущений на сушилку типа ПКС-90 при сушке моркови

Источники возмущений	Вызываемое отклонение : влажность готового продукта в конце сушки				Возможное регулирующее воздействие				Необходимое изменение параметров для компенсации возмущений			
	П : лент	Ш : лент	IV : лент	У : лент	П : лент	Ш : лент	IV : лент	У : лент	П : лент	Ш : лент	IV : лент	У : лент
Начальная влажность материала	380+ 579	238+ 407	98+ 180	17+ 35	93	113	24	12	0,54	0,66	0,3	1,2
Температура воздуха под лентой	90+ 105	91+ 103	90,2+ 102	46,4+ 56	28	22,4	10,5	1,15	0,163	0,13	0,13	0,115
Влагосодержание воздуха	32+ 56	24,7+ 34,6	19+ 38	4,9+ 8,4	12,1	7,6	7	0,16	14,8	12	11,8	9,6
Толщина слоя материала	29+ 48	18+ 36	21+ 38	32+ 50	32,3	30,6	13,2	1,08	0,04	0,045	0,026	0,03
Скорость движения лент	0,017	0,015	0,017	0,003	0,07	0,045	0,087	0,016	0,19	0,18	0,068	0,108
Скорость движения лент	17,5	16	5,8	9,3	0,046	0,061	0,017	0,027				

Компенсация действующих возмущений может быть осуществлена путем изменения скорости движения по крайней мере двух конвейерных лент сушилки.

На основании проведенных исследований были предварительно составлены структурные схемы автоматизации паровых конвейерных сушилок, используемых для сушки круп и для сушки овощей.

Для окончательного выбора структурной схемы управления и определения оптимальных законов регулирующих воздействий было проведено исследование на модели системы управления паровыми конвейерными сушилками.

Схема электронной модели составлена на базе уравнений математического описания динамики процесса сушки и процесса теплообмена в паровом калорифере. В схеме (рис.2) учтены основные нелинейности, взаимосвязь каналов, изменение динамических свойств объекта и другие особенности объекта при сушке круп и овощей.

Оптимальные законы регулирующих воздействий определялись для двух вариантов структурных схем управления:

- изменение скорости конвейерных лент сушилки по отклонениям конечной влажности материала,
- изменение скорости конвейерных лент сушилки по отклонениям начальной влажности материала.

В каждом варианте осуществлялась стабилизация температурного режима.

В качестве основного критерия качества работы системы управления было принято условие минимума отклонения среднего значения влажности готового продукта за 7 часов работы установки от номинального значения.

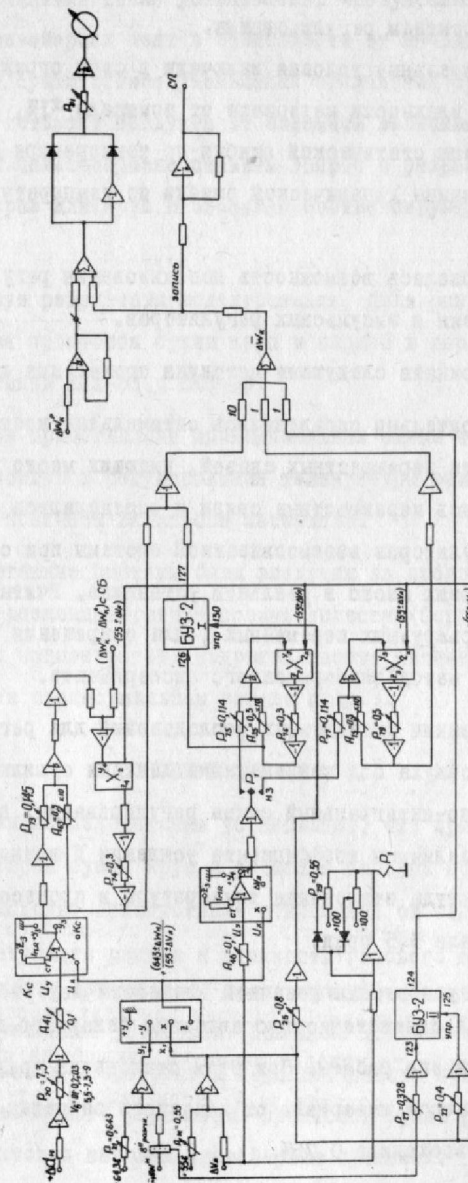


Рис. 2.

Качество работы системы стабилизации температуры воздуха оценивалось временем регулирования.

Дополнительные условия включали в себя ограничения отклонения средней влажности материала от номинала $\pm 1\%$, а также ограничения величины статической ошибки по температуре воздуха 2 град. и величины динамической ошибки по температуре воздуха 4 град.

Исследовалась возможность использования регуляторов непрерывного действия и импульсных регуляторов.

Была принята следующая методика проведения исследований.

Предварительно определялись оптимальные настройки регуляторов без учета перекрестных связей, имеющих место в объекте. Затем замыкались перекрестные связи и определялись оптимальные настройки регуляторов взаимосвязанной системы при случайных возмущениях, имеющих место в реальной установке. Учитывая большое количество варьируемых переменных, для сокращения числа опытов был применен метод планированного эксперимента.

На основании проведенных исследований для регулирования температуры воздуха под конвейерными лентами сушилки был выбран пропорционально-интегральный закон регулирования, а также рабочий диапазон величины коэффициента усиления и времени изотропа. При этом амплитуда отклонения температуры в процессе регулирования не превышала 3,5 град.

Для регулирования конечной влажности материала был выбран регулятор типа статистического автомата релейного действия. Определен алгоритм его работы. При этом отклонение средней величины конечной влажности материала от заданного значения за 7 часов работы не превосходила 0,75%.

Исследованиями также установлено, что управление скоростью движения конвейерных лент в зависимости от начальной влажности материала дает существенное уменьшение отклонения среднего значения влажности готового продукта от заданной величины (до 0,07%). В связи с этим целесообразно ставить вопрос о разработке автоматических влагомеров для круп и овощей с соответствующими диапазонами измерений.

Используя результаты моделирования, была разработана система управления процессом сушки круп и овощей в паровых конвейерных сушилках типов КСА-80 и АКС-90.

В работе представлена принципиальная схема системы, состоящая из 2-х контуров регулирования температуры воздуха и контура регулирования конечной влажности материала.

Разработанные системы были внедрены на предприятиях овощесушильной и прицепконцентратной промышленности (Серпуховском комбинате пищевых концентратов, Надритгайловском овощесушильном заводе, Арзамасском овощесушильном заводе и др.).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

I. Проведенными исследованиями установлено, что при ручном управлении процессом сушки круп и овощей в паровых конвейерных сушилках происходят недопустимые отклонения от заданных значений температурного режима и влажности готового продукта. Это снижает качество выпускаемой продукции и уменьшает производительность сушильных установок. Показана технико-экономическая целесообразность разработки и перспективность применения системы автоматического управления процессом сушки различных пищевых продуктов в паровых конвейерных сушилках.

2. Выполнено математическое описание паровых конвейерных сушилок при стационарном режиме работы, включающее описание процесса теплообмена в паровом калорифере, процесса сушки в движущемся плотном слое материала и процесса конвективного теплообмена в движущемся плотном слое материала при наличии внутреннего источника тепла переменной интенсивности.
3. Теоретически обосновано, что для определения зависимости коэффициента сушки от параметров режима сушки в плотном слое можно пользоваться аналогом формулы Кутана-Лыкова. Выведены численные значения коэффициентов, входящих в эту формулу, при сушке круп и овощей.
4. На основе экспериментальных исследований получены регрессионные зависимости изменения насыпной массы круп и овощей от их влажности.
5. С помощью математического описания определены коэффициенты передачи, характеризующие количественное влияние возмущающих и регулирующих воздействий на конечную влажность и температуру материала.
6. Выполнено математическое описание паровых конвейерных сушилок при нестационарном режиме работы. Получены передаточные функции объекта по всем каналам возмущающих и регулирующих воздействий.
7. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что динамические свойства парового калорифера описываются передаточными функциями линейных звеньев. Каналы, связанные с влажностью материала, обладают существенной нелинейностью.

8. Полученные расчётные зависимости в совокупности с экспериментально установленными закономерностями рассмотренных процессов дают возможность решать все задачи, связанные с оптимизацией и автоматизацией паровых конвейерных сушилок.
9. Определены источники и характер возмущений процесса сушки круп и овощей в промышленных условиях, что, с учётом статических свойств паровых конвейерных сушилок, дало возможность выбрать структурные схемы автоматического управления.
10. На базе математического описания разработана электронная модель системы автоматического управления.
11. Выбраны и обоснованы критерии качества работы системы автоматического управления процессом сушки круп и овощей в паровых конвейерных сушилках.
12. В результате моделирования системы автоматического управления определены структурная схема и параметры настройки регуляторов.
13. На базе исследовательских работ созданы опытно-промышленные образцы систем автоматического управления процессом сушки круп и овощей в сушилках типов КСА-80 и ПКС-90.
14. Производственные испытания и опытная эксплуатация разработанных систем управления подтвердили экономическую эффективность их внедрения в промышленность. Экономическая эффективность автоматизации процесса сушки круп составляет 15 тыс.руб. в год на одну сушилку, процесса сушки овощей - 6 тыс.руб. в год на одну сушилку.
Экономический потенциал при объеме внедрения 100 шт. составляет 1,05 млн.руб.

Обозначения

$t_3, t_4, t_n, t_{cm}, t'_c$ - соответственно температура материала, воздуха, пара, стенки калорифера, воздуха на входе в слой материала;

W, W_p - текущая и равновесная влажность материала; d - влаго-содержание сушильного агента; P_m, P - давление пара в магистрали и в калорифере; G, G_c, G_{cm} - соответственно массовый расход материала и воздуха, масса стенок калорифера; K - коэффициент теплопередачи; K_c - коэффициент сушки; α, α_1 - коэффициенты теплоотдачи от пара к стенке калорифера и от стенки к воздуху;

$\delta_3, \delta_4, \delta_n$ - соответственно удельная масса материала, воздуха, пара; δ_c, δ_n - насыпная масса сухого и влажного материала;

q_n, q_c - внешний и внутренний источник тепла; F, F_2 - внутренняя и внешняя площадь теплообмена калорифера; $F_{мол}$ - площадь проходного сечения регулирующего клапана; C_3, C_4, C_k, C_{cm} - теплоёмкость сушильного материала, воздуха, конденсата и стенки калорифера;

i'', i' - энтальпии пара и конденсата; Q_n - потери тепла в окружающее пространство; δV_k - массовая скорость воздуха; $\frac{M_c}{F}$ - массовая удельная нагрузка материала на ленту; Δd_n - дефицит насыщения воздуха; V_n - объём парового пространства калорифера;

$\alpha, \beta, \gamma, \lambda, A_1$ - коэффициенты пропорциональности; γ - теплота парообразования; τ - время; $K_1, \dots, K_5$ - коэффициенты усиления;

$T_1, \dots, T_6$ - постоянные времени; $\tau_1, \dots, \tau_3$ - величин запаздывания; индексы: n - начальное значение; k - конечное значение; o - начальное установившееся состояние.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Хусид М.А. Экспериментальные исследования динамических характеристик многоярусных конвейерных сушилок. Тезисы докладов и сообщений Всесоюзного научно-технического совещания по интенсификации процессов сушки в химической и смежных с ней отраслях промышленности. Москва, 1965.
2. Хусид М.А. Исследование паровой конвейерной сушилки типа КСА-80 как объекта автоматизации. Тезисы доклада Всесоюзной научно-технической конференции по производству пищевых продуктов из картофеля и дикорастущего сырья. Минск, 1966.
3. Хусид М.А. Математическое моделирование системы автоматизации многоярусных конвейерных сушилок. Консервная и овощесушильная промышленность №8, 1968.
4. Хусид М.А. О влиянии внешних возмущающих воздействий на режим работы паровых конвейерных сушилок. Тезисы докладов Всесоюзной Межвузовской конференции по термическим методам обработки при консервировании пищевых продуктов. Одесса, 1969.
5. Хусид М.А. Математическое описание паровых конвейерных сушилок. Сб. Автоматизация сушильных установок. Материалы докладов Всесоюзного научно-технического совещания по новой технике и прогрессивной технологии в процессах сушки. Москва, 1969.
6. Хусид М.А., Шевалев В.А., Лейчик В.Я. Автоматизация сушки КСА-80. Харьковская промышленность №4, 1969.

По вопросам, рассматриваемым в диссертации, автором сделаны доклады:

1. На Всесоюзном научно-техническом совещании по интенсификации процессов сушки в химической и смежных с ней отраслях промышленности. Москва, декабрь, 1965г.
2. На Всесоюзной научно-технической конференции по производству пищевых продуктов из картофеля и дикорастущего сырья. Минск, май, 1966г.
3. На Всесоюзной Межвузовской конференции по термическим методам обработки при консервировании пищевых продуктов. Одесса, октябрь, 1969г.
4. На Всесоюзном научно-техническом совещании по новой технике и прогрессивной технологии в процессах сушки. Москва, декабрь, 1969г.
5. На Всесоюзном семинаре подсекции измерений и автоматизации секции сушки комитета по сушке при ВСНТО по проблеме "Тепло- и массоперенос". Москва, май, 1968г.

БР04101. Подписано к печати 5.XI.70 г.
Объем 1,5 печ. л. Зак. № 204, тир. 230.
Ротапринт ин-та "Пищепромавтоматика",
г. Одесса, ул. Краснова, № 8.