

664.98

На правах рукописи

**ПОНОМАРЕНКО ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ  
ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДЫМА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальности 05.18.12. – "Процессы и аппараты пищевых  
производств"  
05.13.06. – "Автоматизация и управление  
технологическими процессами  
и производствами (по отраслям)"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Мурманск - 2004

Работа выполнена в Мурманском государственном техническом университете

Научные руководители: доктор технических наук, профессор  
**А.М. Ершов**  
кандидат технических наук, доцент  
**А.А. Маслов**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**С.Т. Антипов**  
доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник, доцент  
**В.Н. Богатиков**

Ведущая организация: ООО «Жаднов»

Защита состоится «09» декабря 2004 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета К 307.009.02 в Мурманском государственном техническом университете по адресу: 183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета по адресу: 183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Мурманского государственного технического университета.

Автореферат разослан «04» ноября 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

*Бражная*

И.Э.Бражная

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В условиях рыночной экономики задача повышения эффективности технологических процессов играет существенную роль, так как позволяет получать продукцию более высокого качества при одновременном увеличении выпуска готовой продукции из того же количества сырья и сокращении производственных затрат, связанных с технологическим процессом производства. Качество технологического процесса определяется тем, насколько оптимально он проводится.

Повышение эффективности процесса копчения связано с интенсификацией процесса дымообразования, что позволяет поддерживать концентрацию дымовоздушной смеси в копильной камере на максимально возможном при текущих внешних условиях уровне и сократить этап процесса копчения, связанный с насыщением пищевого продукта копильными компонентами. Кроме того, температура дыма, по сути, является основным возмущающим воздействием для контура регулирования температуры дымовоздушной смеси в копильной камере. Контроль этой температуры позволяет улучшить динамические характеристики контура регулирования температуры в камере, что связано с появлением дополнительной обратной связи по основному возмущающему воздействию. Внедрение автоматической системы управления (АСУ) процессом позволяет снизить затраты на производство единицы продукции путем постоянного контроля качества технологических процессов дымообразования и копчения. Кроме того, введение в систему контуров сигнализации и регистрации параметров процесса исключает необходимость постоянного контроля со стороны обслуживающего персонала.

Снижение себестоимости продукции может быть достигнуто за счет снижения количества топлива (опилок) для получения копильного дыма путем постоянного контроля плотности дымовоздушной смеси в копильной камере и снижения производительности дымогенератора до минимально необходимой при достижении плотностью дымовоздушной смеси максимально возможных в текущих условиях значений. Кроме того, для дымогенераторов эндотермического типа с электрическим по-

догревом применение АСУ процессом дымообразования позволяет снизить затраты электроэнергии, необходимой для протекания процесса. Однако применение АСУ с жестко заданными параметрами регуляторов не позволяет достичь максимальной эффективности процесса копчения в целом ввиду изменения параметров самого процесса с течением времени. Один из способов решения задачи управления подобными процессами – построение адаптивной АСУ, изменяющей структуру и параметры своих регуляторов для получения наилучшего по выбранным критериям управления. Применение подобных систем позволяет приблизить условия протекания технологического процесса к оптимальным и повысить эффективность технологического процесса в целом.

Внедрение АСУ позволяет добиться повышения качества технологического процесса. Однако это не исключает работу специалистов-технологов, разрабатывающих и обосновывающих технологические карты процессов. Автоматика способна минимизировать в динамике отклонения параметров процесса от параметров, указанных в технологических картах, освобождая обслуживающий персонал технологических установок от необходимости постоянного ручного регулирования контролируемых величин.

Для разработки подобных систем необходимо предварительно разработать методику исследования технологического процесса, что позволит получить необходимые исходные данные для синтеза систем управления. Применение современной компьютерной техники в качестве инструмента для проведения экспериментов согласно разработанной методике и для обработки полученных данных позволяет повысить качество результатов и сократить сроки исследований.

Несмотря на наличие промышленных АСУ со структурой, подобной вышеописанной (особенно в западных странах), высокая стоимость этих систем не позволяет использовать их для автоматизации производств средних и малых отечественных предприятий, бюджет которых зачастую сопоставим со стоимостью подобных установок. Следовательно, возникает необходимость в разработке достаточно эффективных и недорогих отечественных установок с АСУ, которые требуют мини-

мальных затрат на изготовление и внедрение, минимальные сроки окупаемости и, как следствие, повышенный спрос.

Таким образом, задача разработки адаптивной компьютерной АСУ, обеспечивающей повышение эффективности процесса холодного копчения путем интенсификации процесса дымообразования и сокращения времени насыщения сырья копильными компонентами при сохранении высокого качества выпускаемой продукции, является актуальной, практически полезной, требующей решения.

**Цель и задачи исследования.** Целью настоящей работы является повышение эффективности процесса дымогенерации при копчении и процесса копчения в целом за счет применения многоконтурной адаптивной АСУ процессом при сохранении высокого качества выпускаемой продукции. Главной задачей работы является разработка контура управления генерацией дыма системы и научное обоснование его структуры. Для решения главной задачи решены следующие вспомогательные задачи:

1. Проведены предварительные исследования процесса дымообразования, протекающего в автоматизируемом дымогенераторе, с целью получения представления о законах, которым подчиняется данный процесс.
2. Разработана методика исследования процесса дымообразования с целью получения моделей в терминах "вход-выход" с помощью передаточных функций.
3. Разработаны необходимые способы измерения и датчики параметров процесса, структура многоконтурной адаптивной АСУ на основе исследования процесса дымообразования в процессе холодного копчения.
4. Разработана методика предварительной идентификации параметров моделей исследуемых процессов на базе современных математических программных пакетов, система идентификации параметров модели, функционирующая в режиме реального времени, программно реализована методика синтеза оптимальных регуляторов концентрации дымо-воздушной смеси копильной камеры и регулятора температуры дымообразования.

5. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение компьютерной многоконтурной адаптивной АСУ процессом дымообразования в процессе копчения.

**Научная новизна работы.** В диссертации впервые решены следующие вопросы: исследовано распределение температурных полей по кассете с опилками инфракрасного дымогенератора (ИК ДГ) эндотермического типа в процессе его работы при различных начальных условиях и выведены математические зависимости температуры дымообразования от этих условий; выведена зависимость коэффициента теплового рассеивания от начальной влажности опилок в кассете работающего ИК ДГ; разработана и опробована методика построения математических моделей в терминах "вход-выход", описывающих динамику отдельных составляющих процесса дымообразования на базе математического программного пакета Matlab; проведено исследование работоспособности и эффективности компьютерной адаптивной АСУ процессом дымообразования при холодном копчении, показывающее, что разработанная адаптивная АСУ позволяет добиться повышения эффективности технологического процесса при сохранении высокого качества продукции.

**Практическая ценность работы.** Разработана и научно обоснована концептуальная модель копильной среды как объекта управления в процессе дымообразования с целью построения функциональной схемы АСУ. Разработана методика исследования распределения температурных полей внутри кассеты с опилками работающего дымогенератора эндотермического типа. Исследовано распределение температурных полей в ИК ДГ конструкции Ершова-Шокиной. Построена и обоснована функциональная схема двухконтурной системы стабилизации концентрации дымовоздушной смеси с обоснованием выбора наблюдаемых величин и управляющих воздействий. Обоснованы и спланированы эксперименты по определению параметров моделей контуров стабилизации концентрации дымовоздушной смеси и регулирования температуры дымообразования. Разработана и опробована методика обработки экспериментальных данных с целью получения исходных математических моделей процесса. Практически подтверждена возможность использования полученных моделей для настройки АСУ процессом дымообразования

при холодном копчении рыбы. Полученные алгоритмы, методики и аппаратно-программный комплекс могут быть использованы в научно-исследовательских работах, направленных на изучение технологических процессов пищевой промышленности и разработку АСУ технологическими процессами.

**Достоверность** полученных в работе результатов обеспечивается использованием апробированных расчетных методик, согласованием расчетных данных и результатов эксперимента.

**Внедрение.** Результаты диссертационной работы в виде компьютерной АСУ, представляющей собой аппаратно-программный комплекс на базе IBM-совместимого компьютера, внедрены в лаборатории "Современных технологических процессов переработки гидробионтов" (СТППГ) кафедры Технологии пищевых продуктов Мурманского государственного технического университета (ТПП МГТУ). Проведена опытная эксплуатация АСУ копильной установкой МГТУ. По результатам экспериментального исследования технологического процесса холодного копчения разработан учебный тренажер АСУ процессом холодного копчения на базе SCADA-системы (программной системы диспетчерского контроля и сбора данных) Genie 3.0 фирмы Advantech. Тренажер установлен в лаборатории компьютерных систем управления кафедры Автоматики и вычислительной техники (А и ВТ) МГТУ и внедрен в учебный процесс по специальности 210200 "Автоматизация технологических процессов и производств" (по рыбопромышленной отрасли) при изучении дисциплин "Программные средства систем автоматического управления", "ЭВМ и аппаратные средства систем автоматизации и управления".

**На защиту выносятся:** методика исследования распределения температурных полей в дымогенераторах эндотермического типа; разработанная двухконтурная структура АСУ процессом дымообразования при копчении; выведенные математические зависимости температуры внутри кассеты с опилками работающего дымогенератора конструкции Ершова-Шокиной от времени, геометрических размеров кассеты и начальной влажности опилок; методика построения динамических моделей процесса дымообразования при копчении в терминах "вход-выход";

алгоритмы адаптивного управления, учитывающего изменения внутренних и внешних условий в ходе протекания процесса.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались и были одобрены на:

научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, научных работников МГТУ (Мурманск, 2001); всероссийских конференциях "Наука и образование 2002", "Наука и образование 2003" (Мурманск, 2002, 2003 г.г.).

По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы (111 наименований) и 4 приложений. Работа изложена на 154 страницах, содержит 44 рисунка и 3 таблицы. В приложениях представлены результаты экспериментов и листинги программ.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель исследований и научная новизна, показана практическая ценность полученных результатов.

**Первая глава** посвящена описанию технологических процессов копчения и генерации дыма с использованием различных типов дымогенераторов. Приводятся основные параметры копильной среды, влияющие на процесс копчения и качество готовой продукции, допустимые пределы изменения этих параметров, а также существующие способы интенсификации процессов дымообразования и холодного копчения. Обобщены литературные сведения о существующих на текущий момент отечественных типах дымогенераторов и их системах управления, а также основные возможности зарубежных систем. Приводится обоснование необходимости разработки эффективной и недорогой АСУ для малых отечественных предприятий. Даны описание устройства исследуемого

ИК ДГ конструкции Ершова-Шокиной, разработанного на кафедре ТПП МГТУ, и обзор возможных вариантов его автоматизации.

По мнению автора, копильную среду как объект управления можно рассматривать в виде трех взаимосвязанных контуров – контуров изменения плотности дымовоздушной смеси, температуры дымообразования (и связанной с ней температуры дыма) и влажности дымовоздушной смеси. Данные параметры (плотность, температура и влажность дыма) далее рассматриваются в качестве регулируемых параметров в разрабатываемой АСУ. В качестве внешних задающих входных воздействий для дымогенераторов эндотермического типа, к которым относится автоматизируемый ИК ДГ, предлагаются мощность, подаваемая на нагревательные элементы, влажность и концентрация свежего воздуха.

Контур регулирования влажности дымовоздушной смеси предлагается реализовать в виде отдельного контура с кондиционером в качестве регулятора.

Для контуров регулирования концентрации и температуры дыма автором для последующей реализации предлагается двухконтурная функциональная схема системы стабилизации концентрации дымовоздушной смеси с внутренним контуром поддержания температуры дымообразования в заданных пределах и внешним контуром регулирования концентрации дыма, сигнал с регулятора которого является задающим сигналом для внутреннего контура. В качестве задающего сигнала для системы в целом предлагается сигнал задания оператором установки необходимой концентрации дыма.

Кроме того, автором выдвигается гипотеза, что для эффективной работы АСУ необходима дополнительная подсистема адаптации с оптимизацией коэффициентов регуляторов контуров ввиду того, что параметры исследуемого процесса меняются в значительных пределах как в ходе самого процесса копчения, так и при изменении начальных условий (вид и структура топлива (опилок), влажность опилок, температура окружающей среды и т.п.).

Для эффективного решения главной задачи работы – повышения эффективности процесса копчения за счет применения адаптивной АСУ процессом дымогенерации – автором предлагается решение ряда подза-

дач (разработка методик исследования процесса, разработка структуры контуров АСУ, выбор датчиков и органов управления, разработка методики синтеза оптимальных регуляторов и т.п.), которые сведены в единую технологическую карту научных исследований по теме диссертации.

Вторая глава посвящена исследованию распределения температурных полей внутри кассеты с опилками в работающем ИК ДГ и выбору и описанию управляемых величин и элементов системы управления технологическим процессом получения дыма в ИК ДГ в процессе копчения.

Исследование температурных полей в толще сырья в процессе получения дыма в ИК ДГ проводилось на действующем дымогенераторе с помощью разработанной и собранной автором установки, в составе которой: термопара типа ТХА в качестве датчика температуры дыма; ADAM 4011 - модуль аналогового ввода с преобразователем сигнала с термопар; 3 рабочих части термосопротивления типа TCM в качестве датчиков температуры в слое опилок; 3 измерительных моста; 3 усилителя сигнала с блоком питания; ADAM 4017+ - модуль аналогового ввода сигналов в компьютер; ADAM 4520 - модуль преобразования интерфейса RS-485 (интерфейса связи модулей ADAM) в RS-232 (интерфейс последовательного порта компьютера); ПК IBM PC - персональный компьютер с программой для регистрации данных с термодатчиков, выполненной автором в SCADA-системе Genie DAQ.

Установка позволяет одновременно регистрировать данные с датчиков температуры дыма и температуры внутри кассеты с опилками согласно разработанному автором плану экспериментов, выводить их на экран ПК в виде временных зависимостей и в числовом виде, а также сохранять их на диске ПК в виде архивного файла для последующей обработки. Основные графики, полученные в результате обработки экспериментальных данных представлены на рисунках 1-3. Количество избыточной воды в ходе всех экспериментов составляло 50% от массы опилок; удельная поверхность слоя опилок порядка  $10 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; начальная влажность опилок варьировалась в пределах (5...70)%.

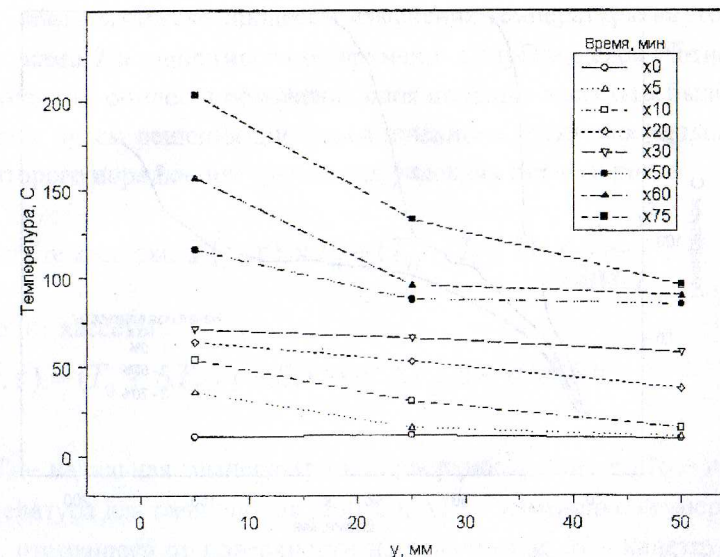


Рисунок 1. Зависимость температуры опилок от расстояния от поверхности; начальная влажность опилок 50%

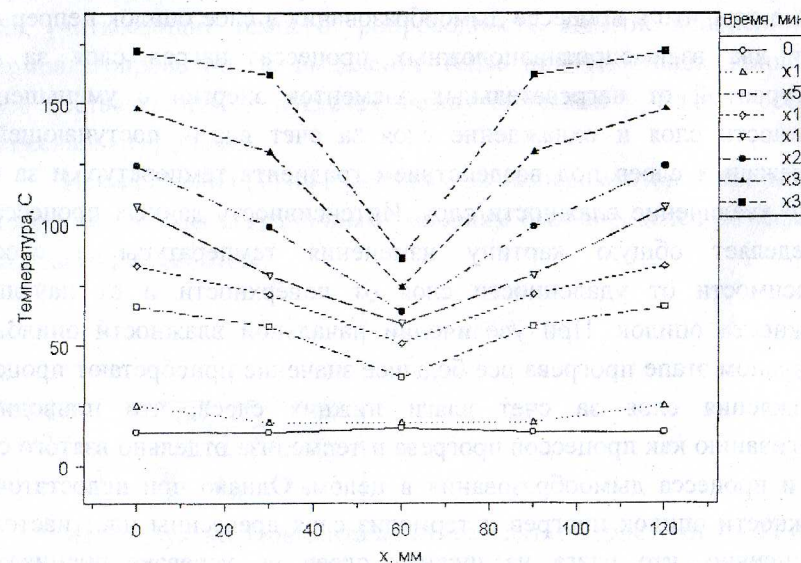


Рисунок 2. Распределение температуры в слое опилок между двумя соседними нагревательными элементами; начальная влажность опилок 50%

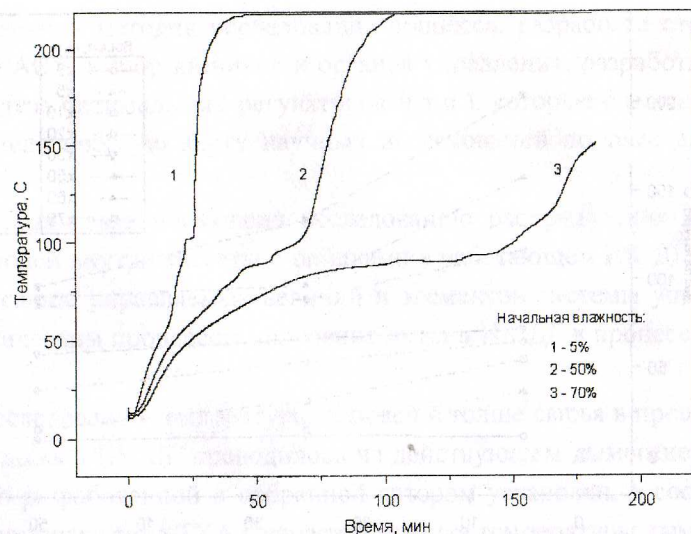


Рисунок 3. Изменение температуры внутри кассеты дымогенератора с опилками при различных начальных влажностях опилок

Анализ результатов экспериментов (рисунки 1-3) позволяет говорить о том, что в процессе дымообразования в слое опилок непрерывно идут два взаимопротивоположных процесса: нагрев слоя за счет поступающей от нагревательных элементов энергии с уменьшением влажности слоя и охлаждение слоя за счет влаги, поступающей из нижележащих слоев под воздействием градиента температур, и за счет этого увеличение влажности слоя. Интенсивность данных процессов и определяет общую картину изменения температуры в слое в зависимости от удаленности слоя от поверхности и от начальной влажности опилок. При увеличении начальной влажности опилок на начальном этапе прогрева все большее значение приобретают процессы охлаждения слоя за счет влаги нижних слоев, что приводит к затягиванию как процессов прогрева и термоллиза отдельно взятого слоя, так и процесса дымообразования в целом. Однако при недостаточной влажности опилок прогрев и термоллиз слоя древесины идет настолько интенсивно, что влага из нижних слоев не успевает проникать в наблюдаемый слой. Это приводит к быстрому термическому разложению всего объема древесины и необходимости частой замены опилок в кассете ИК ДГ.

Математически процессы изменения температуры внутри кассеты с опилками  $T$  в зависимости от времени  $\tau$ , глубины слоя  $y$  относительно поверхности опилок и положения слоя по длине кассеты  $x$  были описаны автором путем решения дифференциального уравнения теплопроводности второго порядка при граничных условиях первого рода:

$$\text{по высоте кассеты: } T(y, \tau) = T_0 + (T_{\Pi} - T_0) \left( 1 - \frac{y}{12a\tau} \right)^2; \quad (1)$$

по длине кассеты:

$$T(x, \tau) = (T_0 + \Delta T_{\text{СЛ}}) + B_1 x - a^2 \Delta T_{\text{СЛ}} \tau - a^2 B_1 x \tau, \quad (2)$$

где  $T_0$  — начальная температура на поверхности опилок;  $T_{\Pi}$  — предельная температура для слоя опилок (230°C);  $\Delta T_{\text{СЛ}}$  — изменение температуры для слоя, отстоящего от поверхности на величину  $y$ ;  $B_1$  — конструктивный тепловой коэффициент, характеризующий уменьшение температуры при удалении от оси нагревательного элемента для конкретного дымогенератора в нулевой момент времени;  $a$  — коэффициент теплового рассеивания, учитывающий температуропроводность, влияние испарения воды, термовлагопроводность, выделение тепла при термоллизе, конвективную составляющую в пустотах между опилками и т.д., то есть комплексный коэффициент.

Из выражения (1) по известным из экспериментов температурным полям, начальным и граничным условиям был определен коэффициент теплового рассеивания:

$$a = \frac{1}{12\tau} \left[ \frac{y}{1 - \sqrt{\frac{T(y, \tau) - T_0}{T_{\Pi} - T_0}}} \right]^2. \quad (3)$$

Используя экспериментальные результаты (рисунки 1 - 3) и выражение (3), было вычислено значение коэффициента теплового рассеивания для проведенных экспериментов. При изменении начальной влажно-

сти опилок от 70 до 5% этот коэффициент для березовых опилок и верхнего слоя меняется в пределах от 0,3 до 80 мм<sup>2</sup>/мин и аппроксимируется параболой вида:

$$a(W) = 59,426 - 0,014W^2. \quad (4)$$

Выведенные зависимости (1)-(4), хотя и позволяют достаточно полно описать происходящие внутри исследуемого дымогенератора температурные процессы, однако являются слабо применимыми для задач автоматического управления ввиду меняющихся начальных условий процесса (температура и влажность свежего воздуха, начальная влажность и структура опилок и т.п.), а также сложности расчетов для конкретных начальных условий и выбранного слоя опилок и, следовательно, неоправданного расхода на эти расчеты машинного времени.

Для эффективного автоматического управления автор предлагает единое обобщающее описание процессов, происходящих во всем объеме кассеты с опилками, на основе которого в первом приближении можно было бы судить о процессах прогрева и термического разложения в кассете ИК ДГ в целом. Подобным описанием является математическое описание процесса изменения температуры дыма непосредственно на выходе из ИК ДГ в виде передаточной функции. Для нахождения температуры внутри кассеты с опилками при известной температуре дыма автором с помощью графоаналитического метода с использованием логарифмических амплитудочастотных характеристик (ЛАЧХ) математических моделей изменения температуры внутри кассеты и температуры дыма была выведена формула коэффициента связи:

$$K_{CB}(p) = 1,5 \cdot \frac{0,113p + 1}{0,035p + 1}, \quad (5)$$

где  $p$  – оператор Лапласа. С учетом формулы (5) при известной температуре дыма  $T_d$  температура внутри кассеты с опилками  $T_{до}$  может быть найдена как

$$T_{до}(\tau) = K_{CB}(\tau) \cdot T_d(\tau) = 1,5 \cdot \frac{0,113 dT_d/d\tau + 1}{0,035 dT_d/d\tau + 1} \cdot T_d(\tau). \quad (6)$$

Применимость описания процесса изменения температуры дыма для описания процесса изменения температуры внутри кассеты была доказана путем сравнения экспериментальных данных и переходного процесса, полученного обработкой выражения (6); среднее квадратичное отклонение (СКО) результатов составило 48 или порядка 7°C.

Таким образом, для контроля и управления процессом дымообразования необходимо контролировать температуру дыма на выходе из автоматизируемого ИК ДГ и поддерживать ее в диапазоне от 80 до 130°C путем регулирования мощности, подаваемой на нагревательные элементы. Достижение температуры дыма 130°C и невозможности ее понижения при работающей системе управления свидетельствует о практически полном прогорании опилок в кассете исследуемого ИК ДГ и необходимости их замены. Совместно с поддержанием необходимого качества подготовки опилок (состав, структура, влажность около 50%) это позволит процессу дымообразования протекать наилучшим образом с образованием максимального количества дыма при потреблении минимального количества сырья (опилок) и электроэнергии.

На основании анализа структуры копильной среды как объекта управления и вышеприведенной информации в качестве регулируемых параметров для контура регулирования плотности дымовоздушной смеси автором предлагаются собственно плотность этой смеси, измеряемая датчиком плотности в копильной камере, и температура дыма на выходе из дымогенератора. Регулирующим органом для контура предлагается блок регулирования мощности исполнительных элементов (специальных инфракрасных ламп).

В качестве датчика оптической плотности (ДОП) дыма был выбран ДОП, являющийся частью измерительного комплекта Н29-И57, подключенного к исследуемой лабораторной копильной установке. В качестве датчика температуры дыма была выбрана термопара типа ТХА 008-000. В качестве внутренней структуры регуляторов автоматизируемых контуров была принята двухконтурная структура с пропорционально-интегральными (ПИ) регуляторами. В качестве исполнительного элемента АСУ был выбран и собран симисторный регулятор мощности нагревательных элементов.

**Третья глава** посвящена вопросам экспериментального исследования и моделирования технологического процесса получения дыма в ИК ДГ в процессе холодного копчения с целью построения математических моделей отдельных составляющих процесса дымообразования, используемых в дальнейшем в качестве начальных моделей для адаптивной АСУ процессом дымообразования в процессе холодного копчения.

Автором был разработан план экспериментов по получению переходных характеристик ИК ДГ при воздействии на него ступенчато-изменяющегося теплового потока, подводимого от нагревательных элементов, а также переходных характеристик копильной камеры как объекта управления по концентрации дымовоздушной смеси. Приведены порядок и условия проведения экспериментов и их результаты — графики переходных характеристик.

Полученные в соответствии с планом экспериментов данные были затем обработаны в программном пакете Matlab по разработанной автором методике, в результате чего были получены математические модели объектов управления в виде передаточных функций.

По приведенным в диссертационной работе результатам обработки экспериментов видно, что коэффициенты передаточных функций объектов управления значительно отличаются (в пределах 100%) друг от друга при изменении внешних условий экспериментов, что доказывает необходимость применения адаптивной АСУ процессом.

В качестве начальных моделей для дальнейшей обработки в контуре адаптации системы управления были выбраны модели, полученные в процессе обработки результатов экспериментов, наиболее приближенных к реальным условиям протекания процесса дымообразования в ИК ДГ (начальная влажность опилок 50%, количество избыточной воды 50%, полностью закрытые заслонки свежего воздуха, 100% мощность нагревательных элементов).

Передаточные функции контуров температуры дымообразования и концентрации дымовоздушной смеси при увеличении мощности излучающих элементов:

$$W_{T_{\text{НАГРЕВ}}}(p) = \frac{165}{279p^2 + 2461p + 1};$$

$$W_{\text{ОП}_{\text{НАГРЕВ}}}(p) = \frac{0,696}{25840p^2 + 510p + 1}. \quad (7)$$

Передаточные функции контуров температуры дымообразования и концентрации дымовоздушной смеси при снижении мощности излучающих элементов:

$$W_{T_{\text{ОХЛ}}}(p) = \frac{140}{166p^2 + 2310p + 1};$$

$$W_{\text{ОП}_{\text{ОХЛ}}}(p) = \frac{0,279}{981643p^2 + 8255p + 1}. \quad (8)$$

Полученные начальные модели (7), (8) были в дальнейшем использованы при построении компьютерной адаптивной АСУ процессом дымообразования при холодном копчении в лаборатории СТППГ МГТУ.

**Четвертая глава** посвящена описанию структуры разработанной адаптивной компьютерной АСУ с описанием подсистем (модулей) цифровых регуляторов, ввода/вывода, идентификации и оптимизации коэффициентов регуляторов отдельных контуров технологического процесса получения дыма ИК ДГ в процессе холодного копчения, а также анализу возможностей построения адаптивной АСУ с использованием современных программных средств (таких, как SCADA-систем), промышленных контроллеров и ЭВМ.

Адаптивные системы в процессе работы позволяют решить три основные задачи:

- оценить текущие значения параметров объекта управления (идентификация объекта управления);
- найти новые значения параметров регулятора, обеспечивающие в выбранном смысле наилучший процесс управления объектом, по идентифицированным параметрам (оптимизация параметров регулятора);

– осуществить процесс управляемого изменения параметров и структуры регулятора с целью получения наилучшего в заданном смысле управления изменяющимся объектом.

В качестве адаптивной АСУ был обоснован выбор беспоисковой АСУ с наблюдателем. Алгоритмы идентификации были разработаны А.А. Масловым, профессором кафедры А и ВТ, подпрограммы идентификации, работающие по этим алгоритмам, были предоставлены А.Ю. Висковым, доцентом кафедры А и ВТ МГТУ. В работе экспериментально доказывается применимость данных алгоритмов для идентификации объектов управления автоматизируемой установки.

Алгоритмы и подпрограмма оптимизации коэффициентов регуляторов были разработаны автором в соавторстве с А.А. Масловым, профессором кафедры А и ВТ МГТУ, на что было получено соответствующее официальное свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. В основе разработанных алгоритмов лежит методика минимизации (путем подбора параметров регулятора по методу координатного спуска) выбранной в качестве критерия качества интегральной оценки вида:

$$J = \int_0^t |e(t)| t dt, \quad (9)$$

где  $e(t)$  – разность между задающим и выходным сигналами (ошибка рассогласования),  $t$  – время переходного процесса.

В работе приводятся экспериментальное обоснование выбора интегральной оценки, алгоритм и подпрограмма метода, а также результаты работы АСУ с оптимизированными коэффициентами регуляторов.

Для реализации в системе управления было выбрано дискретное представление ПИ - регуляторов в виде:

$$U(k) = U(k-1) + a_0 * \varepsilon(k) + a_1 * \varepsilon(k-1), \quad (10)$$

где  $a_0 = K_p$ ,  $a_1 = -K_p + T_0 / T_n$ ,  $K_p$  – коэффициент пропорциональной составляющей,  $T_n$  – постоянная времени интегрирования,  $T_0$  – шаг квантования (период опроса параметров процесса).  $K_p$  и  $T_n$  рассчитываются подпрограммами оптимизации и передаются в подпрограммы цифрового регулятора соответствующих контуров.

Подпрограммы идентификации объектов управления, оптимизации параметров регуляторов, алгоритмов работы регуляторов, ввода/вывода аналоговой и дискретной информации в ПЭВМ, а также служебные подпрограммы (масштабирования, архивации и визуализации данных, сигнализации и т.п.) и интерфейс оператора были реализованы автором в SCADA-системе Genie DAQ фирмы Advantech, описаны в работе и опробованы в ходе экспериментальной работы разработанной АСУ в лаборатории СТТПГ МГТУ.

Аппаратная часть системы управления построена на основе модульного промышленного компьютера MIC-2000 фирмы Advantech. Обмен информацией в системе производится по стандартному последовательному интерфейсу RS-232 и промышленному помехозащищенному последовательному интерфейсу RS-485.

Информация о ходе процесса снимается с датчиков с помощью модулей ADAM 4017 и ADAM 4011 (модулей аналогового ввода сигналов напряжения с датчиков и сигналов с термопар), управляющие воздействия передаются с использованием модулей ADAM 4021 и ADAM 4060 (модулей вывода аналоговых и дискретных сигналов) по интерфейсу RS-485 с использованием модуля ADAM 4520, преобразующего данные в формат интерфейса RS-232 для последующей передачи их на промышленный компьютер. Дискретные сигналы передаются с помощью модуля ADAM 4050. Применение модулей удаленного сбора данных серии ADAM 4000 обеспечивает существенное снижение влияния помех, возникающих в линиях передачи данных, и делает систему более гибкой в плане возможности наращивания количества датчиков, исполнительных механизмов и самих копильных установок. Кроме того, невысокая стоимость модулей (порядка 70\$) делает систему доступной для приобретения малыми предприятиями и быстро окупаемой. Структура АСУ представлена на рисунке 4.

Собранная установка в течение 2 месяцев эксплуатировалась в лаборатории СТТПГ кафедры ТПП МГТУ. В ходе эксплуатации поддерживался весь цикл процесса холодного копчения. Автоматизация процесса копчения дала возможность контролировать температуру дымообразования (путем контроля температуры на выходе из дымогенератора)

и не допускать превышения ею заданных пределов при поддержании максимально возможной при данных условиях плотности дымовоздушной смеси, что позволяет избежать появления нежелательных веществ (в частности, бензапирена) в копильном дыму; экономия электроэнергии при этом составляет от 7 до 15%.

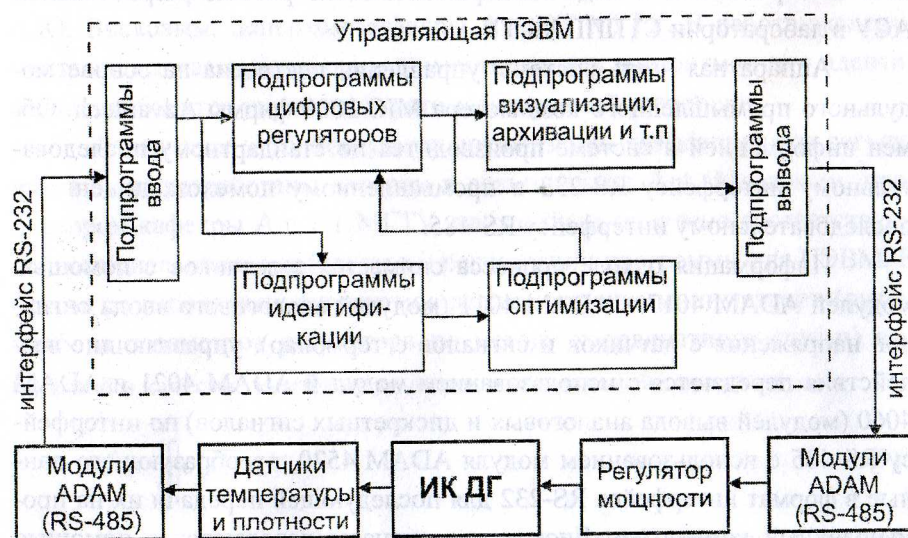


Рисунок 4. АСУ процессом дымообразования в процессе холодного копчения при получении дыма ИК ДГ

## ВЫВОДЫ

1. Предложена и обоснована концептуальная модель копильной среды как объекта управления, описывающая внутренние связи между отдельными составляющими процесса дымообразования при копчении.
2. Предложена методика исследования распределения температурных полей внутри кассеты с опилками работающего дымогенератора эндотермического типа. С помощью данной методики изучено распределение температурных полей в ИК ДГ конструкции Ершова-Шокиной, выведены математические зависимости температуры внутри кассеты с

опилками работающего дымогенератора от времени, геометрических размеров кассеты и начальной влажности опилок. Определена зависимость коэффициента теплового рассеивания в слое опилок от влажности последних.

3. Доказана зависимость температуры дыма на выходе дымогенератора от температуры внутри кассеты с опилками и найдена формула для комплексного коэффициента связи, математически описывающего эту зависимость.

4. Предложен план экспериментального исследования технологического процесса дымогенерации при холодном копчении рыбы, позволяющий с наименьшими затратами времени, энергии и сырья получить информацию, достаточную для разработки и настройки АСУ. Разработана методика обработки экспериментальных данных, направленная на получение исходных динамических моделей процесса в виде передаточных функций с необходимой точностью, с использованием пакета Matlab. Получены исходные динамические модели процесса копчения, позволяющие провести разработку и настройку алгоритмов адаптивного управления. Практически подтверждена необходимость использования адаптивной АСУ, способной подстраиваться под изменение параметров процесса дымогенерации при холодном копчении.

5. Разработаны алгоритмы и программы, на практике подтверждающие работоспособность и эффективность беспоисковой адаптивной АСУ. На основании вычислительных экспериментов выбран критерий качества управления и метод оптимизации регуляторов, управляющих отдельными составляющими процесса холодного копчения рыбы. Работоспособность и эффективность подсистем идентификации и оптимизации подтверждены в ходе опытной эксплуатации.

6. Разработано программное и аппаратное обеспечение адаптивной АСУ процессом дымогенерации при холодном копчении на базе персонального компьютера. Проведены испытания АСУ на действующей копильной установке МГТУ с ИК ДГ, подтверждающие эффективность разработанных программ и высокие эксплуатационные характеристики компьютерной системы управления.

7. Проведена опытная эксплуатация АСУ холодного копчения на копильной установке МГТУ. Обеспечены экономия электроэнергии от 7% до 15%, сокращение этапа насыщения копильными компонентами на 3÷5%, поддержание заданной температуры дымообразования в ходе всего процесса, исключая появление нежелательных веществ в копильном дыму.

**Основные положения диссертации изложены в следующих работах:**

1. Маслов А.А., Пономаренко Д.А. Самонастраивающийся ПИД-регулятор на базе ПЭВМ (программа), 260 кБ. Свидетельство №2000610309 об официальной регистрации от 17.04.2000.
2. Пономаренко Д.А. Установка для оптимальной настройки регуляторов. // Материалы научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, научных работников МГТУ. – Мурманск, 2001. – 3 с.
3. Пономаренко Д.А. Обеспечение оптимальных режимов работы в процессе копчения. // Материалы научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, научных работников МГТУ. – Мурманск, 2001. – 2 с.
4. Пономаренко Д.А. Разработка SCADA-системы копильной установки для использования в учебном процессе. // Межвузовский сборник трудов: По материалам Всероссийской научно-технической конференции «Наука и образование - 2002» – Мурманск: МГТУ, 2002. – 2 с.
5. Пономаренко Д.А. Получение исходных моделей для адаптивной системы управления процессом дымообразования. // Межвузовский сборник трудов: По материалам Всероссийской научно-технической конференции «Наука и образование - 2003». – Мурманск: МГТУ, 2003. – 4 с.
6. Пономаренко Д.А. Некоторые вопросы построения адаптивной системы управления процессом дымообразования при холодном копчении. Деп. во ВНИЭРХ № 1401 рх-2004. – 17 с.
7. Пономаренко Д.А. Исследование динамики процесса дымообразования при холодном копчении с целью получения начальных моделей для адаптивной системы управления процессом. // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. / Мурманск; – 2004. – Том 7, №2. – 6 с.

к 84/16  
л. – 1,39

кой информации»  
нной версией)  
45-32-47