

Автор ер.  
К 17

Библиограф

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

На правах рукописи

КАЛЕНИЧЕНКО Григорий Федорович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА  
СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ГИГРОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА  
В ЗОНЕ УВЛАЖНЕНИЯ ХЛЕБОПЕКАРНЫХ ПЕЧЕЙ

05.13.07 – автоматическое управление и  
регулирование, управление технологическими  
процессами (промышленность)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Перечень 1984

Одесса – 1981



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В соответствии с постановлениями ЦК КПСС и Советского правительства перед хлебопекарной промышленностью стоят большие задачи, связанные с механизацией и автоматизацией производства с целью увеличения выработки, улучшения качества продукции и повышения технико-экономических показателей производства.

Основным производственным агрегатом хлебозавода является хлебопекарная печь, от которой во многом зависит производительность линии, эффективность производства и качество изделий. Высокие показатели работы как тупиковой так и туннельной печи могут быть достигнуты только при автоматическом поддержании рационального гигротермического режима (ГТР) в начальной части пекарной камеры - зоне увлажнения тестовых заготовок (ЗУТЗ).

В настоящее время режим увлажнения определяется субъективно и поддерживается вручную обслуживающим персоналом. Автоматический контроль и регулирование влажности среды, как и непосредственное регулирование температуры среды в ЗУТЗ, не производится, что отрицательно влияет на показатели выпечки.

Причина отставания в области автоматизации хлебопекарных печей заключается в отсутствии первичных преобразователей влажности газовой среды, которые могли бы работать в условиях пекарной камеры, и в недостаточной изученности печей как сложных объектов управления. В связи с этим создание системы регулирования гигротермического режима в зоне увлажнения представляется весьма важной народнохозяйственной задачей. Её актуальность связана также с разработкой АСУТП хлебопекарной промышленности.

Цель работы и задачи исследования. Целью настоящей работы являлось исследование зоны увлажнения хлебопекарных печей как объекта управления и разработка рациональной (оптимальной) систе-

мы регулирования гигротермического режима обработки тестовых заготовок в ЗУТЗ, обеспечивающей повышение эффективности выпечки и качества продукции. Достижение поставленной цели связано с решением таких задач как выбор показателей влажности для высокотемпературной газовой среды, разработка способа получения парогазовой среды заданной влажности, разработка метода и автоматической системы контроля влажности высокотемпературной среды ЗУТЗ, исследование статике и динамики зоны увлажнения печи как объекта управления, разработка, реализация и производственные исследования автоматической системы регулирования ГТР зоны увлажнения, а также оценка её эффективности.

Общая методика выполнения работы состояла в физическом моделировании среды пекарной камеры, теоретическом и экспериментальном исследовании методов измерения влажности газов и объекта автоматизации, теоретическом синтезе системы регулирования и испытаний её в производственных условиях.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- установлено, что выбор показателей влажности не следует связывать с температурой парогазовой среды; предложен и метрологически оценен новый способ получения паровоздушной смеси заданной влажности, основанный на принципе двух парциальных давлений;
- объяснена природа температурной погрешности и получено градуировочное уравнение регрессии термоэлектролитического преобразователя влажности; предложен газоразрядный способ измерения влажности высокотемпературных газов;
- получена полная математическая модель зоны увлажнения хлебопекарных печей, учитывающая взаимосвязь тепло - и массообмена, зависимость притока воздуха и влажности пара от его расхода, а также конденсацию пара на поверхности тестовых заготовок;
- обоснован отдельный принцип регулирования относительной влаж-

ности среды в печах и предложена система регулирования теплового режима пекарной камеры с использованием сигнала по скорости изменения температуры в зоне увлажнения;

- сформулирована задача синтеза оптимальной системы регулирования влажности в ЗУТЗ с учетом технологических требований и принципа минимальной сложности.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

- разработаны усовершенствованные номограммы для расчета показателей влажности газов, установка для получения паровоздушной среды заданной влажности и гигрометры для ЗУТЗ печей;
- синтезирована квазиоптимальная система регулирования ГТР печей;
- разработана и реализована система автоматизации ЗУТЗ печей, повышающая эффективность выпечки и качество изделий; содержатся рекомендации по применению системы.

Реализация в промышленности. Установка для создания контрольной влажной среды испытана Всесоюзным научно-исследовательским институтом метрологии им. Д.И. Менделеева и принята к использованию в Киевском институте автоматики им. XXV съезда КПСС. Автоматическая система контроля и регулирования влажности в ЗУТЗ внедрена на трех печах Киевского хлебокомбината № I, как базового предприятия. Полученный годовой экономический эффект составляет 3750 руб. Ведутся работы по внедрению разработанной системы регулирования ГТР на туннельных печах Броварского хлебозавода, где ожидается экономический эффект 28 тыс. руб. в год.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на Всесоюзной конференции по совершенствованию методов определения влагосодержания в различных средах (К. 1970 г.), Республиканском семинаре по автоматизации технологических процессов (К. 1977 г.), Республиканском семинаре по автоматическому контролю и регулированию тепловлагосодержания газообразных сред (К. 1980 г.), научных

конференциях Киевского технологического института пищевой промышленности (К. 1967, 1970, 1971, 1973, 1976 и 1978 г.г.).

Публикация результатов. По теме работы опубликовано 12 статей и получено 5 авторских свидетельств на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, общих выводов, библиографии и приложений. Основное содержание изложено на 146 страницах машинописного текста; рисунков 58 (на 50 страницах), таблиц 10, библиография из 161 источника, приложений 19.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дана общая характеристика процесса выпечки хлеба, современных хлебопекарных печей, парогазовой среды пекарной камеры и состояния автоматизации ЗУТЗ.

Проведенный обзор и анализ работ свидетельствует о значительном влиянии режима в ЗУТЗ печи на показатели выпечки в целом и существовании оптимальных условий гигротермической обработки тестовых заготовок. Широкий диапазон рекомендуемых и поддерживаемых на практике значений режимных параметров связан с недостаточной изученностью вопроса. Ни одна из известных конструкций ЗУТЗ не обеспечивает оптимального увлажнения, в связи с чем автором предложено оригинальное пароувлажнительное устройство. Наиболее сложной, а следовательно удобной для обобщенного изучения является конструктивно необособленная зона увлажнения широко распространенной, универсальной и экономически эффективной печи типа ФТЛ-2, поэтому она и была принята в качестве базового объекта исследования.

Как вытекает из обзора, все современные отечественные и зарубежные печи снабжены, в лучшем случае, автоматической системой стабилизации времени выпечки, системой контроля и регулирования давления пара, а также системой контроля и регулирования теплового режима пекарной камеры - температуры выпечки, которая допуска-

ет значительные отклонения (до 6 °С), что не обеспечивает требуемого качества продукции.

Вопросу исследования зоны увлажнения как объекта управления посвящено небольшое число диссертационных работ, не полностью освещающих проблему (М.А.Солошенко, Е.Н.Пивень, Л.И.Шубинская, А.И.Сорокин, В.В.Осокин).

Отсутствие средств непрерывного контроля практически исключает возможность регулирования влажности и изучения объекта, а известные системы регулирования теплового режима в пекарной камере не обеспечивают требуемого качества регулирования температуры в зоне увлажнения печей.

В соответствии с результатами проведенного анализа определены задачи исследования.

Вторая глава посвящена изучению парогазовой среды пекарной камеры и разработке установки для её физического моделирования.

Среда пекарной камеры рассматривается как бинарная смесь водяного пара и сухого газа (воздуха). Установлено, что парциальное давление пара в смеси может находиться в пределах 50-100 кПа, а температура - в пределах 100-140 °С при атмосферном давлении.

Как уже отмечалось в работе В.А.Потрошкова, используемое для оценки влажности среды пекарной камеры отношение парциального давления пара  $P_n$  к общему давлению смеси  $P$  не характеризует степень насыщения. В связи с этим рассматриваемый параметр предложено называть не относительной, а объёмной влажностью и обозначать буквой  $\Psi$ . Относительная влажность среды пекарной камеры

$\varphi$  должна вычисляться по общепринятым соотношениям, а также

$$\varphi = \Psi \cdot \frac{P}{P_n}, \quad (I)$$

где  $P_n$  - давление насыщения пара.

Установлена погрешность вычисления показателей влажности

при рассмотрении пара как идеального газа и показано, что при автоматическом контроле влажности удобно определять объемную влажность как функцию, не зависящую от температуры.

Выполненный анализ показателей влажности позволил построить упрощенную номограмму  $\psi, \varphi - P_n$ , усовершенствовать диаграммы  $\varphi - t$  (А.С.Гинзбурга) и  $i - d$  (ВТИ), что позволяет определять объемную влажность и влагосодержание при любых температурах среды.

В связи с отсутствием образцовых гигрометров для условий ЗУТЗ и определенных недостатков (принципиальная непригодность, недостаточная точность) известных генераторов влажности разработаны новый способ (двух парциальных давлений) и установка для получения парогазовой среды заданной влажности. Способ основан на законе Дальтона: вакуумированная и термостатированная камера заполняется сухим воздухом до давления, равного требуемому парциальному давлению воздуха  $P_0$ , затем вводится перегретый водяной пар пока общее давление в камере, а следовательно и парциальное давление пара, не достигнет требуемого значения. Тогда  $P_n = P - P_0$ .

Установка для реализации нового способа включает обогреваемую камеру, парогенератор, форвакуумный насос и комплекс приборов для контроля давления и температуры пара, давления и температуры среды в камере, а также давления, температуры и влажности воздуха в помещении.

Основная погрешность задания влажности в камере определяется классом приборов для измерения давления и температуры среды и не превышает 1%. Методика расчета поправок изложена в диссертации. По заключению ВНИИМ им. Д.И.Менделеева метод двух парциальных давлений является одним из перспективных.

В третьей главе приведены результаты исследования методов измерения влажности высокотемпературных газов и разработки гигрометров для хлебопекарных печей.

Исходя из требований к гигрометрам для печей из всех известных методов для исследования был выбран термоэлектролитический метод, одним из преимуществ которого является высокая точность, В интересующей области температур ( $t = 100-144$  °C) зависимость упругости водяного пара  $E_p$  над раствором хлористого лития от его температуры описана уравнением

$$E_p = 21,2 t_p - 2573 . \quad (2)$$

Исследование лабораторного образца термоэлектролитического преобразователя влажности (ТПВ), разработанного на основе известных низкотемпературных датчиков (ДВТ-I), проводилось с помощью описанной ранее установки. Суммарные погрешности измерений во всех опытах оказались положительными, что свидетельствует о наличии систематической погрешности и подтверждает результат нашего теоретического исследования, где природа такой погрешности объяснена несплошностью раствора, зависящей от тепловой нагрузки датчика.

Получено градуировочное уравнение регрессии ТПВ в виде

$$P_n = 21,56 t_d - 2667,2 , \quad (3)$$

при применении которого погрешность в рабочем диапазоне не превышает 1 % влажности, что соответствует приведенной погрешности 2 % По данным исследования динамики время запаздывания преобразователя равно 41 с, а постоянная времени - 142 с.

В процессе испытаний разработанного на базе автоматического моста опытно-промышленного гигрометра с ТПВ на Киевском хлебокомбинате № I обнаружен ряд эксплуатационных недостатков (необходимость перепропитки, малый срок службы) и установлено, что термоэлектролитические гигрометры целесообразно применять лишь при исследовании печей или в качестве контрольных приборов. Попытка организовать непрерывное измерение влажности путем отсоса среды из ЗУТЗ привела к разработке нового, но сложно реализуемого способа измерения высокотемпературных и высоковлажных газов.

Зависимость тока коронного разряда от подвижности ионов (формула Дейча) позволила разработать новый способ непрерывного измерения влажности, основанный на различной подвижности отрицательных ионов воздуха и пара. Коронный разряд в паровоздушной смеси, характерный для зоны увлажнения хлебопекарной печи, изучался между двумя коаксиальными электродами. Исследование газоразрядного преобразователя влажности (ГПВ), разработанного на этой основе, проводилось с помощью описанной ранее гигрокамеры; высокое напряжение подводилось от стабилизированного источника постоянного тока.

Полученные характеристики ГПВ (рис. I) позволили установить,

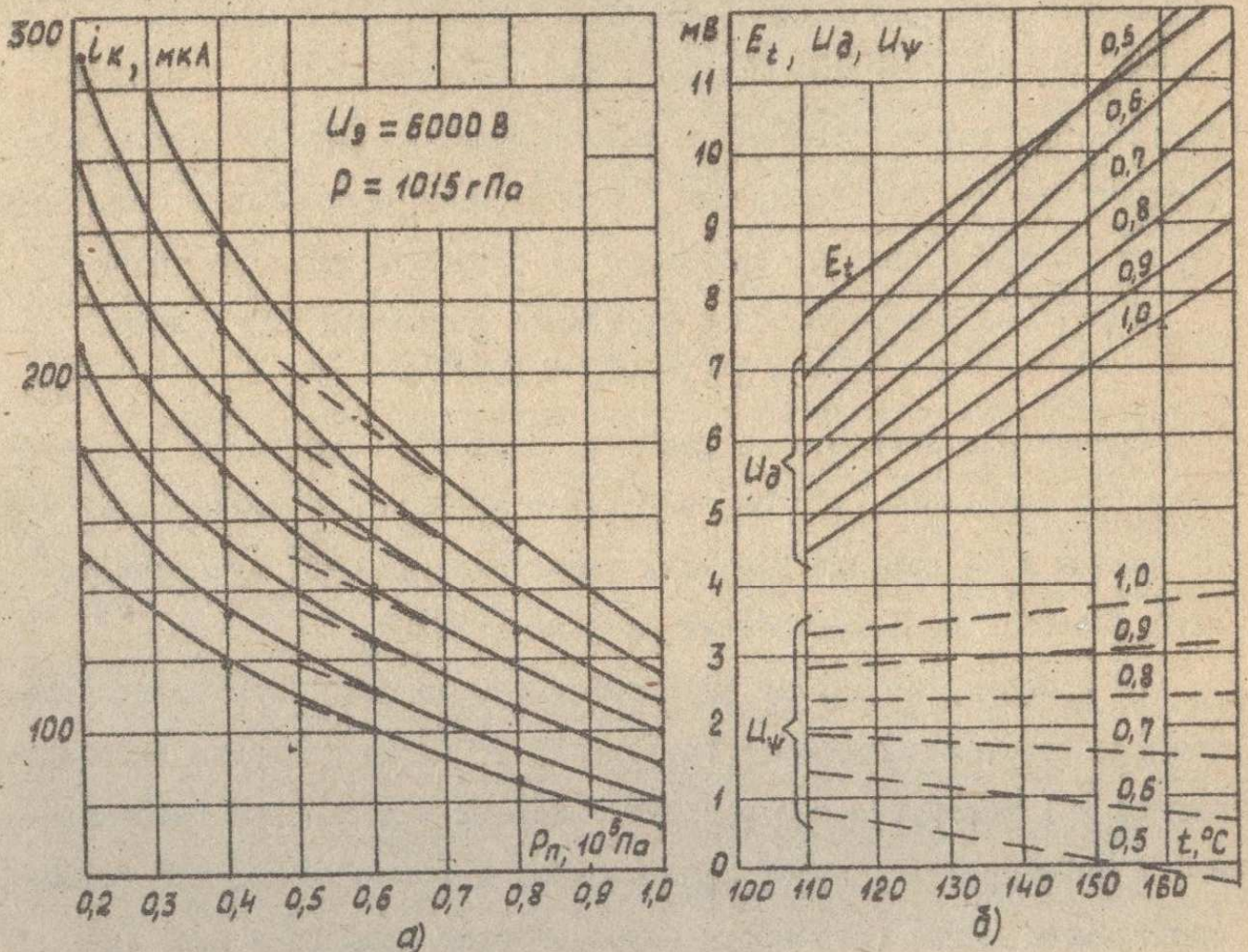


Рис. I. Зависимость тока коронного разряда (а) и компенсированного сигнала (б) от влажности и температуры.

что при рабочих режимах зависимость тока короны  $I_k$  от парциального давления пара  $P_n$  линеаризуется с небольшой погрешностью;

чувствительность к температуре вызывает необходимость термокомпенсации. Переходное запаздывание и постоянная времени ГПВ равны соответственно 30 с и 120 с. Термокомпенсирующий сигнал получается от термопары Гр.ХК, располагаемой рядом с ГПВ. Термокомпенсированный сигнал датчика равен

$$U_V = E_T - R_H i_K, \quad (4)$$

где  $R_H = 65 \text{ Ом}$  - расчетное сопротивление нагрузки.

Длительная производственная эксплуатация гигрометра с ГПВ, разработанного на базе автоматического потенциометра, позволяет сделать вывод о его достаточной статической и динамической точности, надежности и рекомендовать к применению в качестве средства исследования и в системах автоматизации хлебопекарных печей.

Четвертая глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию ЗУТЗ хлебопекарной печи как объекта управления.

В связи с распределенностью параметров пекарной камеры зона увлажнения выделена в самостоятельный объект, который рассматривается как одноемкостный. Согласно параметрической схеме ГТР объекта определяется объемной влажностью  $\psi_c, \%$ , численно совпадающей с парциальным давлением водяного пара  $P_n, \text{кПа}$ , и температурой  $t_c$ ; основными входными величинами являются: расход газа  $G_n$  (температура греющей поверхности  $t_n$  и пекарной камеры  $t_k$ ), расход пара  $G_n$ , степень сухости пара  $x_2$  и производительность печи  $G_x$ , зависящая от загрузки печи  $H$  и времени выпечки  $\tau_g$ .

Пар для ЗУТЗ является не только теплоносителем, но и агентом для увлажнения; влияние рабочих колебаний расхода пара на степень сухости мало и определяется выражением

$$x_2 = x_2^* - \frac{Q_2}{G_n r_2}, \quad (5)$$

где  $x_2^*, Q_2, r_2$  - начальная степень сухости, потери тепла и теплота парообразования соответственно.

Установлено, что приток воздуха в ЗУТЗ пекарной камеры-неуправляемый параметр, связанный с расходом пара уравнением

$$G_в = \kappa_в G_n + G_в^* \quad (6)$$

где  $G_в^*$  - приток воздуха при  $G_n = 0$ .

Как показал анализ, непрерывность выпечки позволяет рассматривать внешний тепломассообмен в ЗУТЗ как квазистационарный процесс. В работе предложена методика расчета коэффициента теплоотдачи и температуры поверхности при конденсации пара на тестовых заготовках, основанная на молекулярно-кинетической теории газов и известном решении задачи прогрева полугограниченного тела с граничными условиями III рода.

Исходя из изложенного составлена математическая модель ЗУТЗ по каждому из режимных параметров. При этом использовался метод материального и энергетического баланса, принят ряд упрощающих допущений; уделялось внимание статике объекта.

Исходное уравнение баланса водяных паров для ЗУТЗ имеет вид

$$G_n^н + G_n^в + G_n^н - G_n^с - G_n^к = 0, \quad (7)$$

где  $G_n^н, G_n^в, G_n^н$  - приток пара насыщенного, с вентиляционным воздухом и испарениями при выпечке изделий;  
 $G_n^с, G_n^к$  - расход пара с удаляемой смесью и в виде конденсата на тестовых заготовках.

После упрощения уравнение теплового баланса объекта имеет вид

$$Q_n + Q_r + Q_k - Q_c - Q_r = 0, \quad (8)$$

где  $Q_n, Q_r, Q_k$  - приток тепла с паром, от греющих поверхностей и с вентиляционным воздухом из пекарной камеры;  
 $Q_c, Q_r$  - тепло, уносимое вентиляционной смесью в вытяжной канал и тестовыми заготовками (для туннельных печей  $Q_k = 0$ ).

После соответствующих подстановок и преобразований уравнений (7) и (8) получены уравнения

$$M_{11} G_n + M_{12} + M_{13} G_x - M_{14} G_n \frac{P}{P-P_n} - M_{15} \frac{P}{P-P_n} - M_{16} G_x P_n + M_{17} G_x t_c = 0; \quad (9)$$

$$M_{21} G_n + M_{22} x_2 G_n + M_{23} t_r - M_{24} t_c + M_{25} G_x + M_{26} G_n t_x + M_{27} t_x + M_{28} - M_{29} G_n t_c - M_{30} G_n \frac{P}{P-P_n} - M_{31} G_n \frac{P}{P-P_n} t_c - M_{32} \frac{P}{P-P_n} - M_{33} \frac{P}{P-P_n} t_c - M_{34} G_x t_c = 0, \quad (10)$$

которые представляют собой универсальную по отношению к различным печам математическую модель ЗУТЗ печи в статике и свидетельствуют о нелинейности объекта.

Важность исследования динамики ЗУТЗ печи связана с необходимостью создания системы регулирования оптимального ГТР и управления процессом выпечки в целом.

Баланс влаги и тепла в переходном режиме описан равенствами

$$M_0 \frac{dP_n}{d\tau} = \sum G_i; \quad C_{3y} \frac{dt_c}{d\tau} = \sum Q_i, \quad (II)$$

где  $G_i, Q_i$  - слагаемые универсальных уравнений статики;

$M_0$  - коэффициент накопления влаги в ЗУТЗ, кг/кПа;

$C_{3y}$  - теплоемкость паровоздушной среды и металла, кДж/К.

После линеаризации и соответствующих преобразований получили взаимосвязанные уравнения динамики объекта

$$T_{10} \frac{d\Delta P_n}{d\tau} + \Delta P_n = K_{11} \Delta G_n + K_{12} \Delta G_x + K_{13} \Delta t_c; \quad (I2)$$

$$T_{20} \frac{d\Delta t_c}{d\tau} + \Delta t_c = K_{21} \Delta G_n + K_{22} \Delta x_2 + K_{23} \Delta G_x + K_{24} \Delta t_r + K_{25} \Delta t_x - K_{26} \Delta P_n, \quad (I3)$$

где  $T_{10}, T_{20}$  - постоянные времени объекта;

$K_{11-13}, K_{21-26}$  - коэффициенты передачи объекта.

В качестве уравнения связи в состав полной математической модели включено уравнение связи (5) в линеаризованном виде

$$\Delta x_2 = K_{31} \Delta G_n. \quad (I4)$$

Полученная модель (I2) - (I4) справедлива для печей различных конструкций; численные значения коэффициентов зависят от типа печи, выпускаемой продукции и режима выпечки.

Аналитическое исследование статики показало, что влияние температуры среды на её влажность невелико (отклонение до 1%), а знак коэффициента передачи объекта по каналу  $G_n \rightarrow t_c$  зависит от типа печи и исходного режима.

Исследование динамики модели объекта проводилось на АВМ типа МН-7 по методу переходных характеристик (рис.2). Обнаружен особый

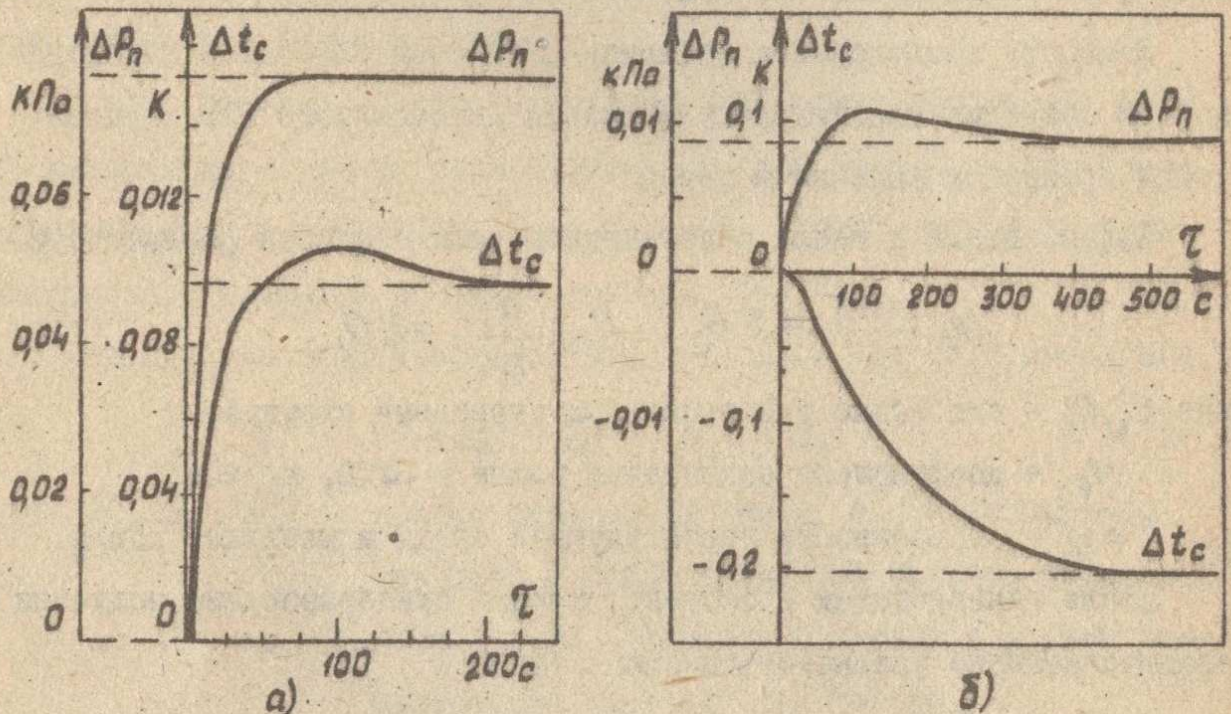


Рис.2. Переходные характеристики модели зоны увлажнения при изменении расхода пара (а) и производительности печи (б).

характер кривых  $\Delta G_n \rightarrow \Delta t_c$ ,  $\Delta G_x \rightarrow \Delta P_n$  (всплески) и форсирование переходного процесса  $\Delta G_n \rightarrow \Delta t_c$  ( $T = 20$  с), что объясняется связью параметров и как следствие, наличием параллельных цепей в структуре каналов с противоположным влиянием и отличающимися постоянными времени. Наименьшую инерционность имеют каналы влажности ( $T = 10$  с), наибольшую - канал  $\Delta G_x \rightarrow \Delta t_c$  ( $T = 195$  с).

Для подтверждения полученных теоретических результатов проведено экспериментальное исследование ЗУТЗ печи ФТЛ-2 на Киевском хлебокомбинате № I, (цех 2), при выпечке городской булки. На этапе подготовки проводились предварительные активные эксперименты, решалась задача выбора и реализации оптимального режима печи.

Исследование статики и динамики ЗУТЗ проводилось по каналам  $G_n \rightarrow \psi_c, t_c$ ;  $G_n \rightarrow \psi_c, t_c$ ;  $G_n \rightarrow \psi_c, t_c$ , причем каналы производительности исследовались относительно времени выпечки  $\tau_g$ , мин, и загрузки печи  $H$ , %. Для измерения влажности среды применялись гигрометры с ТПВ и ГПВ. При исследовании использовались активные методы: прямой (в статике) и переходных характеристик. Экспериментальные данные обрабатывались по общепринятой методике. Как установлено, влажность в ЗУТЗ мало зависит от расхода газа и времени выпечки. При рабочих значениях входных величин статические характеристики описываются линейными уравнениями

$$\begin{aligned} t_c &= 2,2(G_n - 16) + 144; & \psi_c &= 0,059(H - 100) + 75; \\ \psi_c &= 0,088(G_n - 150) + 72; & t_c &= -3,8(\tau_g - 22) + 146; \\ t_c &= 0,11(G_n - 150) + 148; & t_c &= -0,72(H - 100) + 146. \end{aligned} \quad (15)$$

Обнаружено значительное несоответствие экспериментальных переходных характеристик по каналам загрузки печи теоретическим кривым, связанное с невозможностью одновременно изменить загрузку печи вдоль конвейера.

В целом результаты экспериментального исследования ЗУТЗ подтверждают теоретические положения и выводы и могут быть использованы при автоматизации хлебопекарных печей.

Пятая глава посвящена разработке и исследованиям системы регулирования гигротермического режима хлебопекарных печей.

При разработке системы исходили из того, что печь не в состоянии исправить погрешности предыдущих стадий производства; изменение режима оправдано только при значительном изменении качества сырья;

для ЗУТЗ целесообразна система стабилизации параметров ГТР. Ставилась цель получить систему, оптимальную по переходному процессу. Как показал анализ, для обеспечения требуемого ГТР достаточно регулировать один из абсолютных показателей влажности (объемную влажность) и температуру среды. Технологические требования к системе: отклонение времени выпечки  $\pm 0,5$  мин, длительное отклонение влажности и температуры -  $\pm 1,5$  %,  $\pm 1$  °С, кратковременное отклонение - 2,5 %,  $\pm 3$  °С. Кроме того необходима минимизация интегральной ошибки регулирования.

Синтез системы регулирования ГТР включал оценку адекватности математической модели объекту путем сопоставления теоретических и экспериментальных переходных характеристик; более точными считались характеристики, полученные по усредненным опытным данным. Для получения сопоставимых теоретических характеристик модель ЗУТЗ исследовалась на АВМ совместно с моделями первичных преобразователей. При этом, в частности, гигрометр с ГТВ описан уравнением

$$T_{гм} \frac{d\Delta\Psi}{d\tau} + \Delta\Psi = \Delta P_n (\tau - \tau_{гм}). \quad (16)$$

По каналам нагрузки наносили как ступенчатое (время выпечки), так и линейное (загрузка печи) воздействия. Количественная оценка точности модели проводилась по расхождению динамических показателей (до 20 %), по максимальной (до 10 %) и среднеквадратической (5,1-7,3 %) погрешностям.

Различная инерционность участков регулирования влажности и температуры позволяет считать их квазиавтономными в динамике и избежать корректирующих связей. Общая структурная схема разработанной системы регулирования ГТР приведена на рисунке 3. Для регулирования влажности применена одноконтурная система, а для регулирования температурного режима (по температуре выпечки) предложена оригинальная двухконтурная система с опережающим сигналом по

скорости изменения температуры в зоне увлажнения, которая хорошо реагирует на воздействия по загрузке и расходу пара. Особенность предложенной системы в том, что опережающий сигнал отбирается за пределами регулируемого участка. Используя известные структурные преобразования, получены необходимые передаточные функции систем.

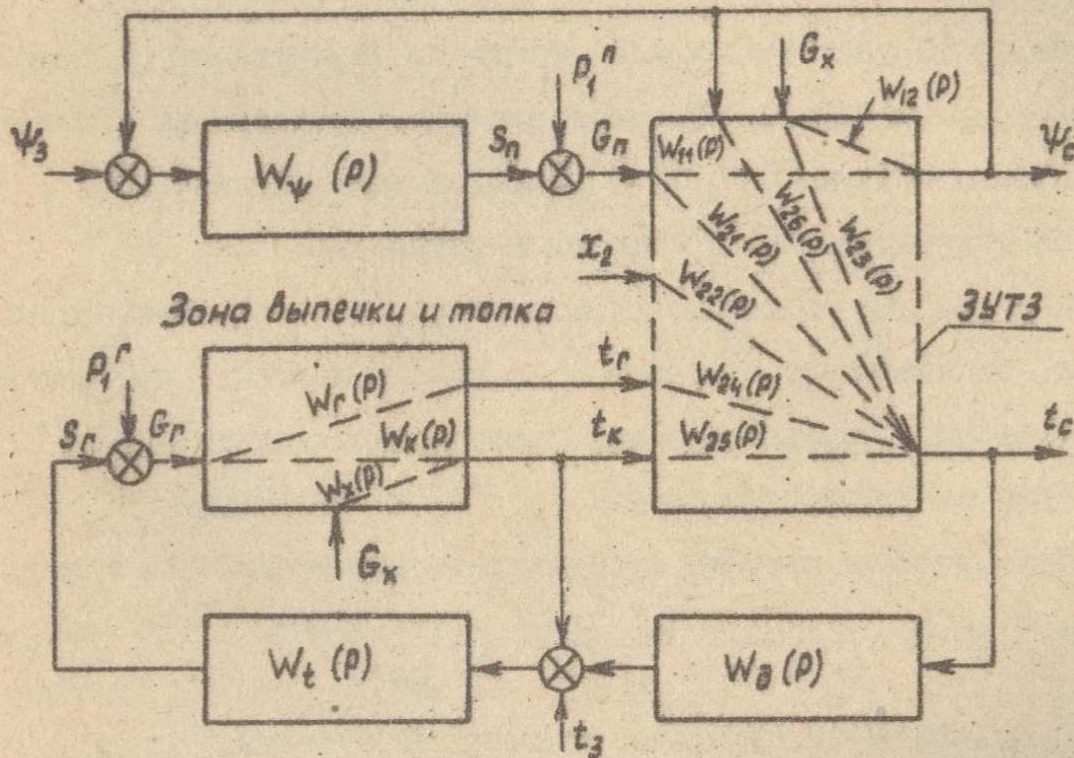


Рис.3. Структурная схема системы регулирования ГТР печи.

В процессе синтеза системы регулирования влажности установлено, что максимальное воздействие по загрузке печи составляет 20 %ХРО, а по давлению пара - 40 %ХРО на паропроводе, причем, изменение загрузки в целом происходит по линейному закону и фактическое время нанесения воздействия не совпадает со временем изменения загрузки. В соответствии с производственными реализациями по давлению пара наиболее тяжелым принято скачкообразное воздействие (кратковременно - 40 %ХРО, длительно - 20 %ХРО).

Исходя из технологических требований и принципа минимальной сложности задача синтеза оптимальной системы регулирования влажности сведена к минимизации квадратичного интегрального критерия

Одесский технологический институт пищевой промышленности им. Н. В. Довгань-ска  
БИБЛИОТЕКА

~~сб 13647~~  
V O 13648

оптимальности

$$J_2 = \int_0^{\infty} (\psi - \psi_{\infty})^2 d\tau = \min$$

при  $C = C_{\min}$  ;  $\Delta\psi_{ст} \leq (\Delta\psi_{ст})_{доп}$  ;  $\Delta\psi_{д} \leq (\Delta\psi_{д})_{доп}$  , (17)

где  $C$  - стоимость регулятора,  $\psi_{\infty}$  - установившаяся влажность;  
 $\Delta\psi_{ст}$ ,  $\Delta\psi_{д}$ ,  $(\Delta\psi_{ст})_{доп}$ ,  $(\Delta\psi_{д})_{доп}$  - статическое и динамическое отклонения влажности и их допустимые значения.

Структура регулятора выбрана исходя из ограничений по графо-аналитическому методу, предусматривающему аппроксимацию объекта звеном первого порядка ( $K_0, T_0$ ) и звеном запаздывания ( $\tau_0$ ). В качестве квазиоптимального выбран П-регулятор.

Параметрический синтез системы выполнен на основе известного выражения, связывающего критерий  $J_2$  с коэффициентами передаточной функции системы, представленной в дробно-рациональном виде.

С учетом регулирующего органа  $W_{р0}(P)$  и гигрометра  $W_{гм}(P)$  передаточная функция системы относительно возмущения имеет вид

$$W_{P_1-\psi}^{з.с.}(P) = \frac{K_0 e^{-\tau_{гм} P}}{(\tau_{10} P + 1)(\tau_{гм} P + 1) + K e^{-\tau_{гм} P}} , \quad (18)$$

где  $K$  - коэффициент передачи разомкнутой системы.

По данным расчета критерий  $J_2$  является экстремальной функцией с минимумом при  $K = 2,76$ . Оптимальное значение коэффициента передачи регулятора влажности  $K_{\psi} = 18,4 \%ХРО/\%$ , что реализуемо.

Для определения качества регулирования и уточнения настроек "реального" П-регулятора с учетом его нелинейностей проведено исследование системы на АВМ. Регулятор описан уравнениями

$$X_{р.э.} = \pm \text{sign } \Delta\epsilon \text{ при } \Delta\epsilon > \delta\psi ; X_{р.э.} = 0 \text{ при } \Delta\epsilon < \delta\psi ;$$

$$\frac{d\Delta S_n}{d\tau} = \frac{S_n^{\max}}{T_{им}} X_{р.э.} ; \Delta X_{о.с.} = K_{о.с.} \Delta S_n , \quad (19)$$

где  $\Delta\epsilon = \Delta\psi - \Delta X_{о.с.}$  ;  $\delta\psi = \pm 0,5 \%$  влажности - нечувствительность реле,  $X_{р.э.}$  - сигнал релейного элемента,  $S_n, T_{им}$  - ход и время полного хода исполнительного механизма,  $S_n^{\max} = 100 \%.$

Исследование показало, что при увеличении  $T_{им}$  колебательность системы уменьшается, а динамическое отклонение параметра и время регулирования возрастает. Оптимальное регулирование (рис.4) имеет место при  $K_{\psi} = 22 \%ХРО/\%$  и  $T_{им} = 30$  с. Преобразователь влажности

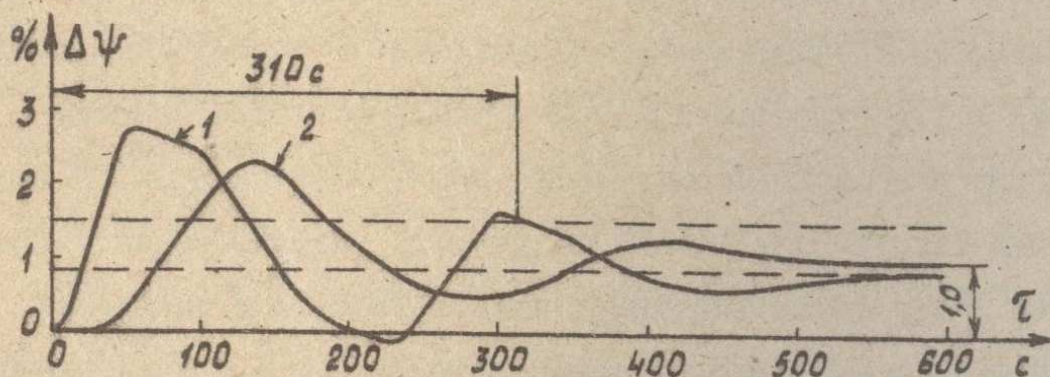


Рис.4. Переходные процессы системы регулирования влажности в ЗУТЗ (1 - на выходе ЗУТЗ, 2 - на выходе датчика).

является фильтром колебаний, в связи с чем окончательная оценка качества регулирования проводилась по выходной величине ЗУТЗ. Полученные данные приведены в таблице.

| Показатель          | $\psi_{\partial}$ , % | $\psi_{ст}$ , % | $\tau_p$ , с | $\sigma$ , % |
|---------------------|-----------------------|-----------------|--------------|--------------|
| Полученное значение | 2,5-2,8               | 1,0             | 310          | 44           |

Результаты исследования свидетельствуют о возможности регулирования влажности в ЗУТЗ печи П-регулятором.

Вид передаточных функций базового ПИ-регулятора температуры выпечки и предложенного дифференциатора температуры в ЗУТЗ известен; параметрический синтез этой системы не проводился.

В шестой главе отражены вопросы разработки, производственных испытаний и внедрения системы автоматизации зоны увлажнения хлебопекарных печей.

Показано, что аппаратурно система регулирования ГТР печи легко реализуется на средствах электроавтоматики. В частности, в

качестве регулятора влажности может быть использовано модернизированное устройство типа БР-3.

Система автоматизации ЗУТЗ разрабатывалась на основе результатов работы с учетом известных прогрессивных решений; учитывалась экономическая сторона вопроса. В процессе испытаний экспериментально-промышленного образца системы на Киевском хлебокомбинате № I (цех 2, печь ФТЛ-2) оценивались: статические и динамические свойства АСР влажности, влияние сигнала по скорости изменения температуры в ЗУТЗ на качество регулирования теплового режима печи, эксплуатационные характеристики и показатели эффективности системы автоматизации. Печь работала в оптимальном режиме; выпекалась городская булка массой 0,2 кг.

По данным испытаний статическая ошибка регулирования влажности и динамические показатели системы соответствуют требованиям. Введение коррекции по скорости изменения температуры в ЗУТЗ позволяет уменьшить динамическое отклонение этой температуры до  $2,0^{\circ}\text{C}$ .

Автоматическое поддержание оптимального ГТР приводит к уменьшению упека в среднем на 0,5 %, улучшению основных показателей качества (глянец, объем, окраска), снижению процента нестандартной продукции. По данным расчета годовой экономический эффект от внедрения системы на одной печи типа ФТЛ-2 составляет 2380 рублей при сроке окупаемости 0,43 года.

Разработанная система принята ведомственной комиссией и рекомендована к внедрению.

#### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Автоматизация зоны увлажнения хлебопекарной печи обусловлена необходимостью обеспечить оптимальный ГТР обработки тестовых заготовок и должна предусматривать регулирование влажности и температуры парогазовой среды.

2. По смыслу отношение парциального давления пара к давлению

смеси следует называть объёмной влажностью и применять при описании гигротермических процессов, автоматическом контроле и регулировании влажности. Другие показатели влажности могут быть вычислены или определены с помощью усовершенствованных диаграмм.

3. Разработанная установка для получения среды с заданной влажностью по способу двух парциальных давлений может быть использована в качестве образцового средства поверки гигрометров.

4. Доказано, что область применения ТПВ в условиях ЗУТЗ ограничена температурами 100-140 °С; гигрометры с ТПВ необходимо градуировать по полученному уравнению регрессии и использовать в качестве контрольных.

При оптимальном сечении вентиляционных каналов, теплоизоляции корпуса и автоматической компенсации влияния температуры среды разработанный гигрометр с ТПВ обеспечивает длительный контроль влажности с погрешностью до 1,5 % при всех режимах ЗУТЗ и может включаться в автоматическую систему регулирования.

5. Как установлено приток вентиляционного воздуха в ЗУТЗ зависит от расхода пара, что определяет статические свойства объекта.

6. Согласно исследованиям ЗУТЗ является линеаризуемым статическим объектом со взаимосвязанными параметрами. Полученная математическая модель объекта в общем виде является полной и универсальной. Инерционность объекта невелика, что следует учитывать при экспериментальных исследованиях. Наилучшими статическими и динамическими свойствами обладают каналы: расход пара - влажность и время выпечки - температура среды.

7. Автоматический контроль и регулирование относительной влажности в таких объектах как ЗУТЗ целесообразно осуществлять по разделному принципу: по абсолютной влажности и температуре среды.

8. Загрузка печи изменяется практически линейно и воздействие по этим каналам не может быть ступенчатым в принципе.

9. Как показали исследования на АВМ математическая модель ЗУТЗ печи адекватна реальному объекту.

10. Исходя из технологических требований при регулировании влажности следует минимизировать квадратичный интегральный критерий качества при ограничениях на отклонение параметра и стоимость системы, что может быть достигнуто с помощью одного контура с П-регулятором. Для повышения качества регулирования теплового режима необходимо использовать сигнал по скорости изменения температуры в ЗУТЗ печи, что предусмотрено в предложенной двухконтурной системе.

11. Результаты моделирования разработанной АСР влажности указывают на необходимость учета нелинейностей реального регулятора, а также на неточность оценки качества регулирования по инерционному гигрометру.

12. По данным производственных испытаний разработанная система автоматизации является работоспособной и обеспечивает требуемое качество регулирования по всем показателям, чем способствует снижению упёка, уменьшению брака и улучшению качества продукции. Срок окупаемости системы 0,43 года, что свидетельствует о её экономической эффективности. Система может быть рекомендована для широкого применения в хлебопекарной промышленности как самостоятельно, так и в составе АСУТП.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Влажность воздуха в рабочих камерах хлебопекарных печей / Г.Ф.Калениченко, А.В.Володарский, Д.И.Скобло, А.А.Михелев. - Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1973, № 7, с. 9-11.

2. Об определении показателей влажности воздуха в пекарных камерах / Г.Ф.Калениченко, А.В.Володарский, Д.И.Скобло, А.А.Михелев. - Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1975, № 9, с. 11-12.

3. А.с. 203978 (СССР). Способ получения воздуха и пара с заданным значением влажности / Г.Ф.Калениченко. - Оpubл. в Б.И., 1967, № 21.

4. КАЛЕНИЧЕНКО Г.Ф., СКОБЛО Д.И. Установка для испытания гигрометров при высоких температурах. - Измерительная техника, 1971, № 6, с. 74-76.

5. А.с. 301600 (СССР). Способ измерения влажности высокотемпературных газов / Г.Ф.Калениченко, Г.Ф.Иванченко. - Опубл. в Б.И., 1971, № 14.

6. А.с. 321744 (СССР). Способ определения состава газа / Г.Ф. Калениченко. - Опубл. в Б.И., 1971, № 35.

7. КАЛЕНИЧЕНКО Г.Ф., СКОБЛО Д.И. Исследование статики зоны увлажнения тестовых заготовок хлебопекарных печей, - Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1978, №1, с. 123-126.

8. КАЛЕНИЧЕНКО Г.Ф., СКОБЛО Д.И. К исследованию статики зоны увлажнения тестовых заготовок хлебопекарных печей. - Автоматическое управление технологическими процессами пищевой промышленности : Краснодар, КПИ, 1979, вып. 92, с. 48-55.

9. КАЛЕНИЧЕНКО Г.Ф., ЛАДАНЮК А.П. Экспериментальное исследование зоны увлажнения тестовых заготовок хлебопекарной печи ФТЛ-2 как объекта управления. - Реф. информация : Пищевая промышленность : Киев, Вища школа, 1978, вып. 13, с. 44-45.

10. КАЛЕНИЧЕНКО Г.Ф. Контроль и регулирование относительной влажности. - Реф. информация : Пищевая промышленность : Киев, Вища школа, 1976, вып. II, с. 36-37.

11. КАЛЕНИЧЕНКО Г.Ф. Система регулирования гигротермического режима в зоне увлажнения тестовых заготовок хлебопекарных печей. - Промышленная теплотехника, Киев, Наукова думка, 1979, т.1, № 1, с. 76-79.

12. КАЛЕНИЧЕНКО Г.Ф., ЛАДАНЮК А.П., СУЛИМЕНКО Д.С. Применение балансного реле типа БР-3. - Реф. информация, серия УШ : Монтаж и наладка средств автоматизации и связи : 1973, вып. 6(56), с.24-26.

Подписано к печати 17.04.81 БФ 26108 Объем 125 п. л.

Формат 60x84 $\frac{1}{4}$  Тираж 150 Зак. 1-2568 Бесплатно

Киевская книжная типография научной книги, Киев, Репина, 4.