

Авторефер,

Б 53

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

БЕСПАЛОВ Игорь Николаевич

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ УСТАНОВОК КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ
ВОЗДУХА В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

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

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса – 1979

Поверніть книгу не пізніше
зазначеного терміну

производственных
пищевой промыш-

ских наук,
И.П.

ель науки
доктор

, профессор

Варламов М.Л.

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

Литвянов А.М.

Ведущая организация:

Всесоюзное научно-производ-
ственное объединение
"Пищепромавтоматика"

Защита состоится "18" май 1979 г. в 14³⁰ час.
на заседании специализированного совета К 068.35.01 (специаль-

технического института пищевой
039,

ОНАХТ 08.04.11

Синтез и исследование та.



v013306

специализированного совета

к.т.н., доцент

с-б 13306 И.С. МИРОНОВ

Одесский технологический

институт пищевой промыш-

ленности им М.В. Ломоносова

V 013306

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Повышение эффективности общественно-го производства является основной линией экономического развития нашей страны в текущем пятилетии и на длительную перспективу, важнейшим условием создания материально-технической базы коммунизма.

В пищевой промышленности кондиционирование воздуха (КВ) позволяет интенсифицировать технологические процессы, сократить потери при переработке и хранении пищевых продуктов, улучшить качество продукции. Все возрастающие масштабы использования систем кондиционирования воздуха (СКВ), а также значительные величины капитальных и эксплуатационных затрат на их внедрение и содержание обуславливают необходимость повышения экономической эффективности СКВ. Достижение этой цели связано как с сокращением энергозатрат на КВ, так и с увеличением положительного эффекта в основном технологическом процессе обработки пищевых продуктов или при их хранении за счет поддержания оптимальных параметров микроклимата, а также искусственной ионизации воздуха.

Неразрывность технологического процесса КВ и способов его реализации с помощью управления определяет актуальность оптимизации управления по критериям, соответствующим задаче повышения эффективности СКВ указанными путями. Для СКВ с центральными кондиционерами соответствующей производительности экономически оправдано применение оптимизационных алгоритмов управления, реализуемых как локальными автоматическими системами регулирования (АСР), так и подсистемами АСУТП. На современном этапе общую задачу управления СКВ целесообразно решать на двух уровнях - на верхнем выбирается оптимальный алгоритм функционирования объекта для заданных условий, на нижнем осуществляется его реализация соответ-

ствующими автоматическими управляющими устройствами и АСР параметров микроклимата.

Объектом исследования в диссертационной работе являются локальные АСР и подсистемы нижнего уровня АСУТП, а также СКВ как управляемый объект.

Цель работы заключается в повышении эффективности СКВ путем повышения качества АСР за счет использования оптимальных алгоритмов управления и методов их расчета.

Научная новизна. Разработан метод исследования СКВ как управляемого объекта с учетом взаимосвязи основных его параметров: температуры, влажности, концентрации аэроионов. Показана методика математического описания с помощью структурных схем и дифференциальных уравнений, позволяющая в условиях изменения параметров и структуры объекта сохранить неизменной структуру математической модели. Усовершенствованы и разработаны способы математического описания кондиционируемого помещения с учетом пространственной распределенности параметров воздуха (ПРПВ), что позволяет исследовать помещение по каналам управления в связи с вопросами воздухораспределения. Разработана методика составления и решения дифференциальных уравнений воздуховода по концентрации аэроионов с использованием теории подобия.

Развито применение методов синтеза оптимального управления для решения прикладных задач. В частности, разработаны методики расчета и алгоритмы: квазиоптимального по быстродействию управления температурой, статистически оптимального управления ионизационным состоянием воздуха, связанного управления температурно-влажностным режимом СКВ. Предложен и исследован способ использования метода оптимального синтеза для достижения требуемых показателей качества управления.

Практическая ценность заключается в возможности получения уточненных динамических характеристик помещения, воздуховода и СКВ по всем каналам, необходимых для расчета управления. Разработанные оптимальные алгоритмы и методы их расчета составляют базу для создания современных регуляторов или программного обеспечения АСУТП, позволяющих повысить эффективность СКВ.

Внедрение результатов работы. Полученные методы исследования и расчета, оптимальные алгоритмы использовались при разработке систем управления температурно-влажностным режимом четырех СКВ колбасного цеха Котовского мясокомбината Одесского производственного объединения мясной промышленности. Фактический экономический эффект от внедрения составил 48 тыс.руб. в год при сроке окупаемости 0,36 года. Разработанная автоматизированная система ионизации воздуха для обработки сельскохозяйственных культур передана ВПО "Союзводпроект". Ожидаемый экономический эффект от ее использования составляет 112 тыс.руб. в год.

Апробация работы. Материалы работы докладывались и обсуждались на семинаре "Кибернетика и автоматическое управление" научного Совета по проблеме "Кибернетика" АН УССР (г.Одесса, ноябрь 1976); всесоюзной конференции "Научно-технический прогресс в зерноперерабатывающей промышленности" (г.Одесса, сентябрь 1977), на УИ научно-техническом совещании по кондиционированию воздуха (г. Тбилиси, май 1977).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 8 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, библиографии из 134 наименований, приложений. Основное содержание изложено на 138 страницах машинописного текста, 61 рисунке, 10 таблицах. Приложения с вспомогательными выводами, алгоритмами и программами расчета содержат 44 стра-

нии, включая 3 программы расчета на ЦВМ и расчет экономической эффективности.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе анализируется область применения СКВ и искусственно ионизированного воздуха в пищевой и других отраслях промышленности. Рассматривается общая характеристика СКВ как управляемого объекта, обсуждаются с точки зрения требований к АСР существующие методы описания и управления СКВ, включая методы оптимизации технологических режимов КВ.

Использование статистических характеристик регулируемых параметров микроклимата помещения на базе методов оптимизации Креслина А.Я. и Рымкевича А.А. позволило доказать, что глобальному критерию экономической эффективности на нижнем уровне управления отвечают критерии точности. Их оптимизация в АСР позволяет обеспечить наиболее экономичные в пределах допустимой области значения параметров микроклимата, расширяет возможность использования оптимальных режимов КВ, усиливает положительное влияние кондиционируемого воздуха на обслуживаемые технологические процессы пищевой промышленности.

Анализ существующего состояния в области теории и практики управления СКВ в свете поставленной цели и путей ее достижения выявил необходимость в решении следующих основных задач по разработке и исследованию:

- методов учета ПРПВ в помещении с целью повышения степени адекватности его описания по каналам управления;
- обобщенной модели СКВ как многомерного объекта с учетом требований методов оптимального синтеза и необходимости реализации управления;
- оптимальных алгоритмов связанного управления температурно-

влажностными параметрами СКВ и ионизационным состоянием воздуха;

- перспектив использования полученных результатов для программного обеспечения АСУТП или создания многофункциональных регуляторов для СКВ в пищевой промышленности.

Во второй главе исследуется математическая модель микроклимата в помещении и разрабатываются методы ее получения на основании определения гидродинамической структуры потоков, как это делается в химической технологии и освещено в работах Кафарова В.

Применительно к помещению ПРПВ описывается разбивкой его объема на зоны: идеального смешения, в которых распределение отсутствует, и идеального вытеснения, в которых отсутствует перемешивание в направлении движения потока. Под зоной понимается условно выделенная часть помещения объема V_i , куда входит и выходит поток с объемным расходом Φ_i . Определение структуры потока, т.е. представление его модели в виде системы зон, позволяет определить границы зон и расходы через них. После этого задача тепло-массообмена в каждой зоне решается без известных допущений, принятых при анализе всего помещения как одной зоны. При исследовании динамики по каналам управления для большинства случаев воздухораспределения трехмерное ПРПВ можно аппроксимировать двумерным — на плоскости, проходящей через приточные и вытяжные отверстия.

Количественная оценка ПРПВ сводится к получению переходной функции концентрации, так называемого, индикатора в уходящем потоке при скачке ее во входящем, которая представляется в нормированном виде $h_c(t) = h(t) / h(\infty)$. Было обосновано применение в качестве индикатора — паров воды, это позволило достаточно просто наносить возмущение, а измерение влагосодержания на физической модели осуществлять мокрым термометром, в помещении — равновесным термометром хлористолитиевого подогревного датчика.

При отсутствии значительных местных источников тепла и сосредоточенной подаче воздуха, ориентируясь на известные схемы с горизонтальными приточными струями или сверху-вниз, в помещении можно выделить основной контур циркуляции воздуха, который включает: приточную струю, прямой поток от струи до вытяжки, обратный поток от прямого к расширяющейся струе. Струя представляется зоной идеального вытеснения, а прямой и обратный потоки разбиваются на зоны идеального смешения. В помещении имеется также "мертвая" зона объемом V_m , достигающим, как показали эксперименты, 40% всего объема V , куда практически не попадает воздух из основного контура, а, следовательно, указанный объем исключается из процессов тепло-массообмена в динамике.

Известно, что зоне идеального смешения по концентрации индикатора соответствует аperiodическое звено первого порядка, а зоне идеального вытеснения – звено транспортного запаздывания. Постоянная времени или запаздывание определяются как $T_i = V_i / \Phi_i$. Передаточная функция всего потока по концентрации индикатора от притока до вытяжки имеет вид

$$W_c(p) = \frac{C(p)}{C_0(p)} = e^{-\tau_c p} \frac{q (T_m p + 1)(T_{m+1} p + 1) \dots (T_n p + 1)}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1) \dots (T_n p + 1) - 1 + q} \quad (I)$$

Соответствующая структурная схема модели потока показана на рис. 1. Коэффициент рециркуляции $q = \Phi_o / \Phi_c$ отражает увеличение расхода воздуха в конце струи и в прямом потоке $\Phi_c = \Phi_o + \Phi_p$ по отношению к приточному Φ_o за счет обратного потока с расходом Φ_p . Экспериментальные исследования на физической модели дали $q \approx 0,5$, что отличается от расчетных значений из теории струй и обусловлено отличием границ зоны приточной струи от границ собственно струи. Эквивалентное запаздывание в зоне струи находится известными методами после определения длины зоны.

Методика определения структуры потока заключается в экспери-

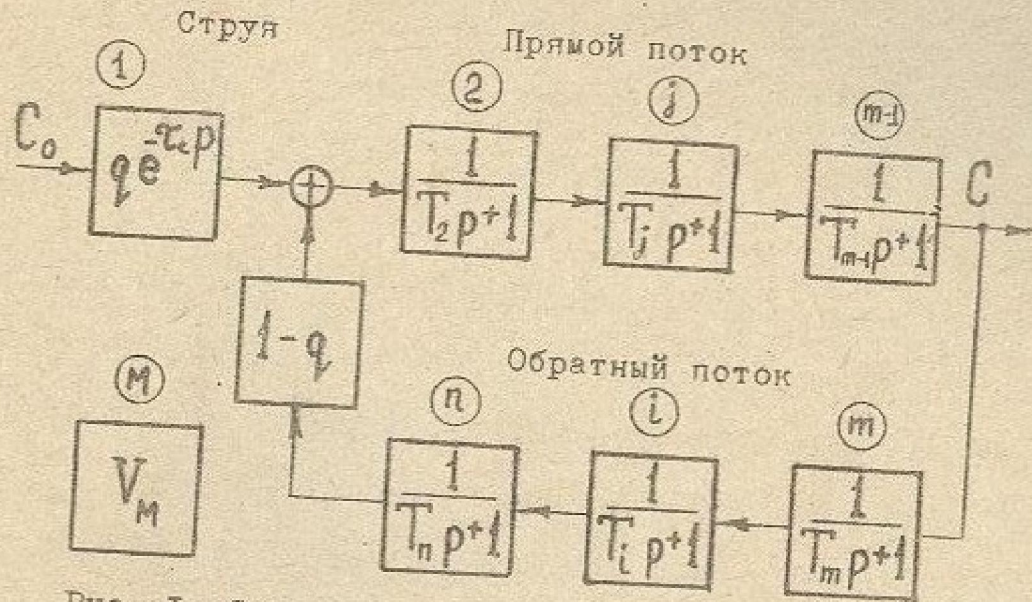


Рис. 1. Структурная схема потоков.

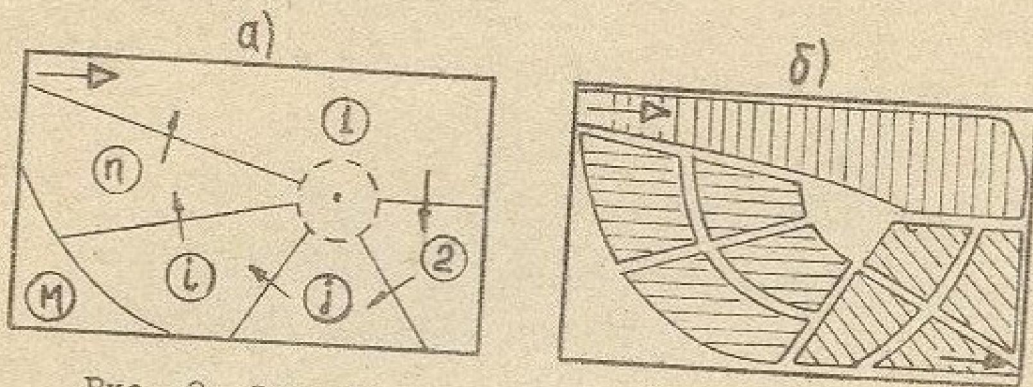


Рис. 2. Структура потоков в помещении:
 а) - принцип разбивки на зоны,
 б) - выделение элементарных зон.

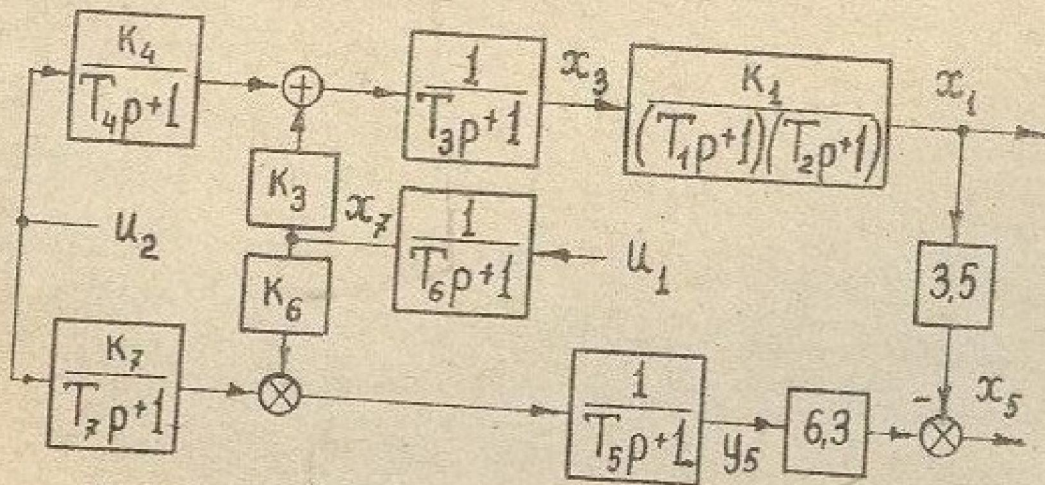


Рис. 3. Обобщенная модель СКСВ.

ментальном определении $h_c(t)$, ее аппроксимации передаточной функцией $W_c(p)$, что позволяет определить в (I) постоянные T_i , а, следовательно, - объемы всех зон, основной принцип размещения которых показан на рис. 2а.

В большинстве случаев определение $h_c(t)$ удобнее выполнять не в помещении, а на его физической модели, воспроизводящей только структуру потоков, что значительно упрощает изготовление модели и проведение эксперимента. Для неизотермической струи подобие определяется критерием Архимеда, из которого следует соотношение между масштабами: температуры m_θ , времени m_t , геометрическим m_L для модели и натуре $m_\theta = m_L / m_t$. Теоретические и экспериментальные исследования влияния турбулентного аналога диффузионного критерия Прандтля на характер процессов смешения показали, что для помещения оно отражается необходимостью приближенного равенства (по порядку величин)

$$v_1 L_1 \approx v_2 L_2 \quad (2)$$

где v_i, L_i - средние скорости движения и размеры двух зон идеального смешения в помещении, или в помещении и его модели.

Из (2) следует, что прямой и обратный потоки можно аппроксимировать ячеечными моделями, т.е.

$$T_2 = T_3 = \dots T_{m-1} = T_n, \quad T_m = \dots T_n = T_p, \quad (3)$$

а каждую зону идеального смешения представлять в общем случае, как слой параллельных по потоку элементарных зон идеального смешения (см. рис. 2б) с объемами в прямом и обратном потоках

$V_{эп} < V_{эр}$, поскольку средняя скорость прямого потока больше обратного, а размеры зоны идеального смешения во всех направлениях при изотропной турбулентности должны быть сравнимыми по величине.

При использовании (3) значительно упрощается определение

T_i из (I). $W_c(p)$ находится по кривой разгона $h_c(t)$ методом площадей Симю либо с помощью АВМ. Первый момент распределения, т.е. площадь между $h_c(t)$ и $1(t)$ является средним временем пребывания потока в помещении T_B , с помощью которого находят-ся объемы мертвой зоны V_M и струи V_c

$$V_M = V - \Phi_o T_B, \quad V_c = V - V_M - mV_n - (n-m)V_p. \quad (4)$$

Объемы зон идеального смешения прямого и обратного потоков V_n и V_p находятся по величинам T_n и T_p , а также расходам Φ_c и Φ_p .

Передаточная функция i -зоны по температуре, влагосодержанию, концентрации аэроионов записывается в виде

$$W_{si}(p) = \frac{s_i(p)}{s_{i-1}(p)} = \frac{1}{T_i p + 1 + \sum_{j=1}^n \alpha_{sij} [1 + W_{Tj}(p)]}, \quad (5)$$

где s_i, s_{i-1} - значения параметра в зоне и во входящем потоке, α_{sij} - безразмерный коэффициент потерь на j -ое ограждение. При конвективном теплообмене W_{Tj} отражает изменение температуры поверхности ограждения от температуры воздуха. Ограждения рассматривались как однородные "толстые", "тонкие с высокой теплопроводностью" и "тонкие, омываемые с двух сторон", пластины. Передаточные функции W_{Tj} найдены аппроксимацией известных трансцендентных выражений. Показано, что эквивалентные постоянные "тонких" ограждений соизмеримы с постоянными остальных звеньев СКВ и пренебрежение ими даже в переходных процессах приводит к ошибкам, особенно по отношению к инерционности по влагосодержанию.

Были уточнены значения α по влагосодержанию и концентрации аэроионов, дана количественная оценка влияния температуры и влажности на потери заряда. Передаточные функции помещения по всем каналам управления от притока до точки установки датчика находятся в соответствии со схемой на рис. I и передаточными функциями

зон $W_{s_{ij}}(p)$. При действии стационарного однородного возмущения S_f установка датчика в i -зоне обеспечивает минимум величины

$$\sigma^2 = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n (s_i - s_f) V_i, \quad \text{если } K(i) = \frac{\bar{K}^2}{\bar{K}}, \quad (6)$$

где $K(i) = k_1, k_2, \dots, k_i$, $\bar{K} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n K(i) V_i$, $\bar{K}^2 = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n K^2(i) V_i$,

k_1, k_2, \dots, k_i - статические коэффициенты передачи каждой зоны из (5).

В третьей главе рассматривается обобщенная модель СКВ как объекта управления по каналам температуры, относительной влажности и концентрации аэроионов в помещении. Для анализа использовалась схема кондиционера с первой рециркуляцией, калорифером первого подогрева, камерой орошения с обводом, калорифером второго подогрева. Требуемый алгоритм функционирования СКВ реализуется соответствующим алгоритмом управления, в котором выделяются предписания по перестановке пяти имеющихся регулирующих органов и подключению одного или двух исполнительных механизмов к АСР, а также предписания по стабилизации в заданных пределах температуры и влажности с помощью соответствующих АСР. Для всех возможных режимов КВ были найдены 10 вариантов модели СКВ как управляемого объекта в АСР при двух управляющих воздействиях, при одном воздействии в некоторых оптимальных режимах можно использовать те же варианты.

Анализ динамических характеристик всех звеньев СКВ позволил представить структуру объекта в виде схемы на рис. 3, где

x_1, x_5, y_5 - температура, относительная влажность и влагосодержание воздуха в помещении, x_3 - температура приточного воздуха,

x_2 - условное положение регулирующего органа. Система дифференциальных уравнений объекта в матричной форме

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = A\bar{x} + B\hat{u} \quad (7)$$

где вектор-столбец фазовых координат \bar{x} , помимо указанных величин, содержит $x_2 = \frac{dx_1}{dt}$, $x_4 = \frac{dx_3}{dt}$, $x_6 = \frac{dx_5}{dt}$.

Предложенная модель отвечает принципу полной наблюдаемости в смысле определения ее состояния по результатам прямых измерений и дифференцирования, что является необходимым для синтеза оптимального управления. Структура модели остается неизменной для всех вариантов, меняются лишь величины T_i и K_i , которые были определены в численном виде для наиболее типичных значений динамических характеристик СКВ.

Для учета динамики исполнительных механизмов постоянной скорости разработана модель СКВ в виде системы типа (7), но 9 порядка, в которую были введены координаты x_8 и x_9 , отражающие положения регулирующих органов

$$\frac{dx_8}{dt} = \frac{1}{T_{ум}} u_1 - a_{88} x_8, \quad \frac{dx_9}{dt} = \frac{1}{T_{ум}} u_2 - a_{99} x_9 \quad (8)$$

x_7 - является температурой после камеры орошения, $x_4 = \frac{dx_7}{dt}$.

При таком подходе структурная схема зависит от режима работы, что находит свое выражение в изменении формул для коэффициентов a_{ij} , b_{ij} матриц A и B , которые связывают значения параметров модели с известными динамическими характеристиками звеньев СКВ. Указанные формулы для всех вариантов приведены в работе.

При использовании коронного ионизатора в приточном воздуховоде динамика СКВ по концентрации аэроионов определяется воздуховодом и помещением. Исследование воздуховода путем составления и решения на ЭВМ дифференциальных уравнений с учетом биполярной зарядки и распределения заряда по радиусу и длине воздуховода позволило найти определяющие комплексы подобия

$$K_{\pm(t)} = \frac{n_c^{+(t)}}{n_0^{+(t)}} = f_{\pm(t)}[M, N, \Psi, Re], \quad M = \frac{R}{L}, \quad N = \frac{k \cdot e n_0^- R}{2 \epsilon_0 v_c}, \quad \Psi = \frac{n_0^+}{n_0^-}, \quad Re = \frac{2 R v_c}{\nu} \quad (9)$$

где n_0 - начальная концентрация, n_c - средняя по расходу концентрация на выходе, R, L - радиус и длина воздуховода, v_c - средняя скорость движения воздуха, k - электрическая подвижность, e - заряд электрона, ϵ_0 - диэлектрическая постоянная, ν - кинематическая вязкость воздуха, (+), (-) - обозначения положительных или отрицательных аэроионов.

Результаты расчетов были подтверждены физическим моделированием, некоторые из них представлены на рис. 4. Соответствующие графики в работе позволяют определять потери заряда при инженерных расчетах.

Транспортное запаздывание в воздуховоде и струе обычно мало, поэтому модель СКВ по аэроионам имеет вид, показанный на рис. 5, f_{u1} и f_{u2} - отражают случайные возмущения в помещении и в измерительной системе. Для минимизации дисперсии в АСР в качестве управляемой величины использовалось среднее значение концентрации на выбранном интервале τ_u

$$z_u = \frac{1}{\tau_c} \int_{t-\tau_u}^t (z_2 + f_{u1}) dt, \quad (9)$$

что позволило пренебречь влиянием f_{u2} . Для синтеза импульсной АСР была найдена модель для дискретного времени $k\tau_u$ в виде

$$\bar{z}(k+1) = \Phi \bar{z}(k) + \Psi u_u(k) + \Gamma \xi(k), \quad \bar{z} = \|z_i\|, \quad i=1,2,\dots,5, \quad (10)$$

где $\xi(k)$ - последовательность независимых случайных величин с единичной дисперсией, Φ, Ψ, Γ - матрицы

В четвертой главе разрабатываются оптимальные законы управления СКВ по различным каналам и проводятся их исследования. Для

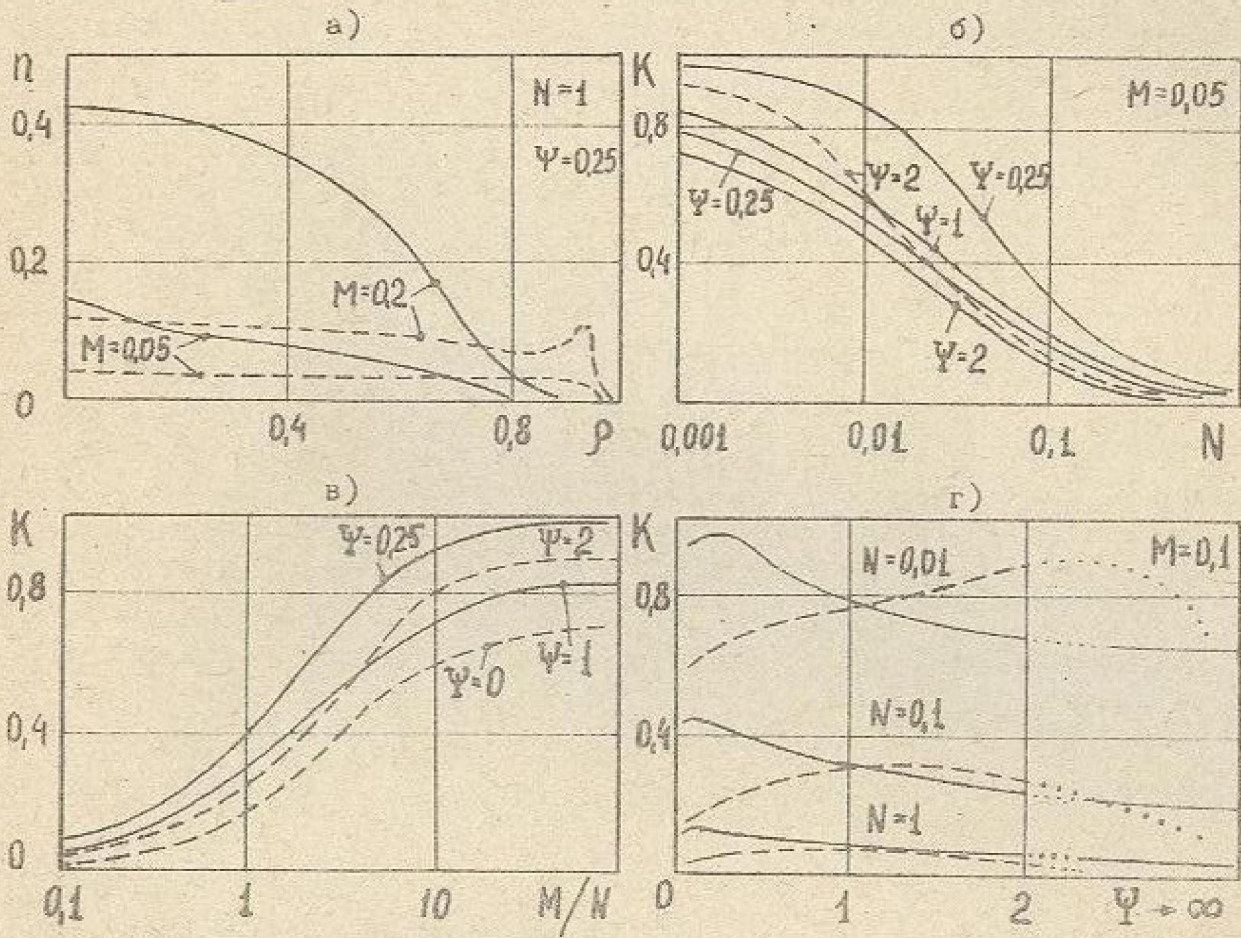


Рис. 4. Характеристики воздуховода по концентрации аэроионов: а) распределение по радиусу ρ ; б) коэффициент передачи; в) коэффициент передачи при приближенном подобии; г) влияние коэффициента униполярности; — положительные аэроионы; --- отрицательные.

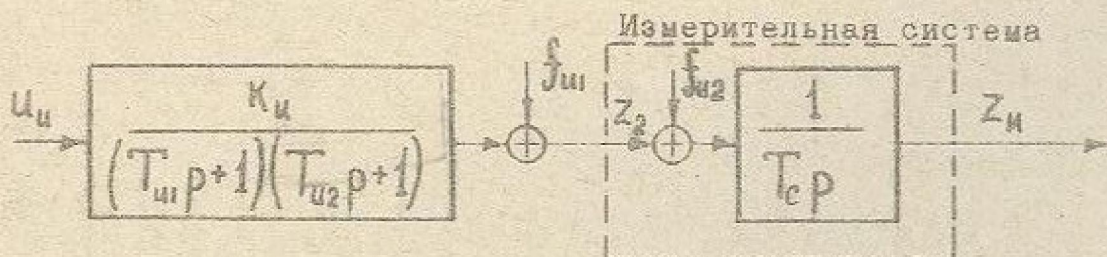


Рис. 5. Модель СКВ по концентрации аэроионов.

синтеза оптимального закона связанного регулирования температурно-влажностного режима был развит метод интегральных оценок Красовского А.А., в котором минимизируется квадратичная форма фазовых координат объекта при ограничении

$$I = \int_0^{\infty} \bar{x}' Q \bar{x} dt, \quad \int_0^{\infty} (\bar{u}' G \bar{u} + \bar{x}' R B G^{-1} B' R \bar{x}) dt = c. \quad (11)$$

Оптимальное управление в векторной и скалярной формах

$$\bar{u} = \|u_i\| = -G^{-1} B' R \bar{x}, \quad u_i = -k_i u_i, \quad \mu_i = \sum_{j=0}^n b_{ji} \sum_{k=0}^n r_{jk} x_k \quad (12)$$

где Q - весовая матрица, c - константа ограничения,

B' - транспонированная матрица B , G^{-1} - обратная матрица

G . Управление находится с точностью до постоянных множителей

$K = \|k_i\| = G^{-1}$ из системы $0,5n(n+1)$ линейных, алгебраических уравнений, определяющих симметричную матрицу $R = \|r_{ij}\|$

$$A' R + R A = -Q. \quad (13)$$

В работе показано, что указанный метод соответствует изопериметрической задаче с постоянным множителем Лагранжа равным нулю, что упростило определение R , но обусловило неопределенность G . Анализ изопериметрического ограничения показал, что оно влияет на величину условного экстремума функционала потерь

$$I = \bar{x}'_0 R \bar{x}_0 - c \quad \text{где } \bar{x}_0 \text{ - вектор начальных условий объекта (6).}$$

Система остается оптимальной при любой G , поэтому при синтезе можно не задавать c , а изменять G так, чтобы величина I либо показателей переходного процесса приняла желаемое значение.

При ограничении управляющих воздействий $|u_i| \leq u_{mi}$ оптимальное управление по Красовскому А.А. релейно $u_i = -u_{mi} \text{sign } \mu_i$. Было доказано, что минимальное значение функционала потерь в релейной системе меньше, чем в линейной. Если в линейной системе

выбрать K_i достаточно большим, то величина Γ приблизится к абсолютному минимуму, а управление будет иметь вид

$$u_i = \begin{cases} -K_i \mu_i, & |K_i \mu_i| < u_{mi} \\ -u_{mi} \operatorname{sign} \mu_i, & |K_i \mu_i| \geq u_{mi} \end{cases} \quad (14)$$

Практически задача синтеза сводится к обоснованию Q и определению G из (13). Решение (13) выполнялось численными методами по разработанным программам на ЭВМ "Наири-К" для модели седьмого порядка и на "ЕС-1020" - для девятого. В последнем случае показана возможность использования метода для объекта с нулевыми корнями путем введения в уравнения a_{88}, a_{99} . Окончательно управляющая функция представлялась в виде

$$\mu_i = K_{i1} x_1 + K_{i3} x_3 + K_{i5} x_5 + K_{i7} x_7 + K_{i8} x_8 + K_{i9} x_9 + \frac{d}{dt} (K_{i2} x_1 + K_{i4} x_3 + K_{i6} x_5) \quad (15)$$

$i = 1, 2$

Из-за того, что число управляющих воздействий меньше числа фазовых координат, а также из-за использования в качестве координат температур и влажности СКВ, при действии возмущений в АСР появляется статическая ошибка. Ее уменьшение обеспечивается соответствующим выбором Q и введением в оптимальный закон интегральной составляющей

$$u_1 = -K_1 \left(\mu_1 + \frac{1}{T_{01}} \int_0^t x_1 dt \right), \quad u_2 = -K_2 \left(\mu_2 + \frac{1}{T_{02}} \int_0^t x_5 dt \right) \quad (16)$$

Непосредственное использование величины функционала потерь затруднено, поэтому выбор Q и G основывался на достижении наилучших для данного объекта показателей переходного процесса: максимального динамического отклонения, быстродействия, статической ошибки и осуществлялся многовариантными расчетами методом проб на аналоговых и цифровых моделях АСР. Основные результаты исследования следующие: а) оптимальный вид функционала потерь

$$I = \int_0^{\infty} (q_1 x_1^2 + q_5 x_5^2) dt \quad (17)$$

~~с. 6. 13306 V013306~~

б) для достижения требуемых показателей достаточно варьировать q_1 и q_5 , а $K_1 = K_2$ задавать постоянными такой величины, чтобы коэффициенты передачи регулятора были близки к 50% х.р.о/град;

в) при постоянных изодрома $T_{oi} \approx 3000$ с, статическая ошибка от суточных или сезонных колебаний климата практически отсутствует, а качество переходных процессов сохраняется на оптимальном уровне;

г) оптимальная АСР обладает достаточной грубостью к изменениям параметров объекта, что позволило найти усредненные значения коэффициентов в (15) для каждого из 10 вариантов модели типовых СКВ, при которых АСР одинаково близко к оптимальной при всех возможных изменениях в объекте и которые можно использовать в качестве отправной точки при разработке и настройке любой АСР;

д) использование модели (6) с X_8, X_9 позволяет найти релейный закон управления исполнительными механизмами так, чтобы управляющее воздействие в пересчете на ход регулирующих органов оставалось близким к линейному.

Сравнение оптимальной АСР и АСР с прямым управлением температурой и влажностью по ПИ-закону показало увеличение быстродействия и уменьшение максимального динамического отклонения в 1,5 раза для возмущений в помещении, для остальных — в 2–10 раз. При случайных возмущениях в рабочей полосе частот объекта наблюдается уменьшение дисперсии ошибки в 2–3 раза.

Предложенный закон связанного регулирования отличается достаточно высоким быстродействием, но оно все равно хуже, чем в оптимальных по быстродействию законах, что открывает дальнейшие пути улучшения показателей АСР, особенно в пусковых режимах СКВ. Применительно к контурам температуры "точки росы" или приточного воздуха из калорифера и камеры орошения или воздуховода, описываемых уравнениями

$$T_1 \frac{dy}{dt} + y = k_1 u, \quad T_3 \frac{dx}{dt} + x = \left(T_2 \frac{dy}{dt} + y \right) k_2 \quad (18)$$

где $|u| \leq 1$ x, y - измеряемые фазовые координаты,

был разработан квазиоптимальный по быстрдействию алгоритм. Традиционные алгоритмы для данного объекта не применимы из-за необходимости оптимизации быстрдействия только по выходной координате x . Линия переключения на фазовой плоскости xOy для наиболее вероятных начальных условий ограничивается отрезком на оси Oy ,

что привело к квазиоптимальному алгоритму:

$$u = \begin{cases} -\text{sign } x, & |x| > \delta_x \\ \frac{T_2 - T_1}{k_1 T_2} y, & |x| = \delta_x \\ -k \left(x + \frac{1}{T} \int_0^t x dt \right), & |x| < \delta_x \end{cases} \quad (19)$$

Удержание изображающей точки в окрестности нуля $|x| < \delta_x$ осуществляется любым линейным регулятором во избежание образования контура с положительной обратной связью и автоколебаний. Применение оптимального алгоритма, реализованного в виде релейной приставки, позволило уменьшить время переходных процессов в 2,5-3 раза по сравнению с ПИ-регуляторами.

Оптимизация управления концентрацией аэроионов осуществлялась статистическими методами по критерию минимума дисперсии $M[z_n^2]$. Было показано, что непрерывные законы содержат производные высокого порядка. В импульсной АСР используется прогнозирование управляемой величины на основании предыдущих значений управляющего воздействия и управляемой величины. Ее представление в виде $z_n(k) = z_1(k) + z_4(k)$, где z_1 и z_4 зависят только от управления u_n и возмущения f_{u1} соответственно, позволило получить решение уравнений объекта (10) в виде рекуррентных соотношений

$$z_n(k+1) = z_n(k) - \gamma_4 \xi(k+1) + \gamma_4 \xi(k) + \frac{\gamma_{45} \gamma_5}{\gamma_4} z_u(k) + \Delta z_1(k+1) - \left(1 - \frac{\gamma_{45} \gamma_5}{\gamma_4} \right) \Delta z_1(k) \quad 20$$

$$\Delta z_i(k+1) = z_i(k+1) - z_i(k) = f \left[\sum_j^k u_u(j) \right] \quad (21)$$

При выбранном способе измерения $\xi(k)$ является неизвестной и непредсказуемой. Оптимальное управление обращает в нуль прогноз управляемой величины $\hat{z}_u(k+1) = z_u(k+1) - \gamma_4 \xi(k)$. Тогда, ограничиваясь двумя членами ряда в (21), получено

$$u_u(k) = - \left[K_{u1} z_u(k) + K_{u2} u_u(k-1) + K_{u3} u_u(k-2) + K_{u4} u_u(k-3) \right] \quad (22)$$

Оптимальный регулятор на базе элементов памяти и сумматора может настраиваться в АСР даже без расчета K_{ui}

В пятой главе анализируются результаты внедрения оптимальных АСР при автоматизации промышленных СКВ и разрабатываются перспективы использования результатов работы. Практическая проверка осуществлялась при автоматизации СКВ колбасного цеха Котовского мясокомбината и системы ионизации воздуха для обработки сельскохозяйственных культур для В/О "Совзводпроект". Экспериментальные динамические характеристики помещения и СКВ подтвердили адекватность предложенных моделей. АСР с оптимальными законами были изготовлены на базе элементов регуляторов РНИБ. Уменьшение дисперсии ошибки в 3 раза позволило перейти от стабилизации параметров воздуха в точке на I-d диаграмме к многоугольнику при сохранении допустимой области отклонения параметров $\pm 1^{\circ}\text{C}$ и $\pm 5\%$. Достижимая только за этот счет экономия энергозатрат, рассчитанная для эксплуатации в 2 смены кондиционера КТ-20 в течение года для г. Одессы, составляет 1180 руб. и увеличивается пропорционально производительности по воздуху.

Для реализации управления СКВ по методу оптимальных режимов с использованием оптимальной АСР был разработан упрощенный алгоритм верхнего уровня, который определяет оптимальный алгоритм функционирования СКВ, т.е. осуществляет необходимые переключения регулирующих органов, коэффициентов и заданий оптимальных АСР.

Соответствующее логическое устройство использует состояние конечных выключателей исполнительных механизмов и реле, определяющих положение изображающей точки внутреннего микроклимата на I-d диаграмме.

Возможность использования оптимальных алгоритмов для создания универсальных многофункциональных регуляторов СКВ подтверждена анализом разработанных структурных схем регуляторов температурно-влажностного режима и концентрации аэроионов, ориентированных на применение интегральных микросхем.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Глобальному критерию экономической эффективности СКВ при разработке подсистем управления нижнего уровня соответствуют критерии точности поддержания заданных параметров микроклимата.

2. Математическая модель СКВ по температуре и влажности в виде предложенных обобщенной структурной схемы и системы дифференциальных уравнений позволяет учесть переменные структуру и параметры объекта, а также условия его полной наблюдаемости и реализуемости управления. В модели по концентрации аэроионов динамические и статические характеристики определяются описанным пространственным распределением плотности заряда в помещении и воздуховоде.

3. Учет пространственного распределения параметров воздуха в помещении путем использования разработанных моделей аэродинамической структуры потоков воздуха и методов их расчета повышает точность математического описания помещения по каналам управления.

4. Использование разработанной методики синтеза позволяет найти оптимальный закон связанного регулирования температуры и влажности, в котором два управляющих воздействия формируются в виде линейных комбинаций от измеряемых величин и их производных.

а также интегральных составляющих для устранения статических ошибок. Коэффициенты оптимального закона находятся из системы линейных алгебраических уравнений.

5. Разработанный квазиоптимальный по быстродействию алгоритм управления и методы его реализации позволяют повысить точность стабилизации микроклимата в помещении за счет форсирования переходных процессов по промежуточным параметрам кондиционера.

6. Управление концентрацией аэроионов при действии случайных возмущений в помещении и измерительной системе с помощью разработанного алгоритма с прогнозированием в дискретном времени минимизирует дисперсию управляемой величины, в качестве которой используется среднее значение концентрации за определенный интервал времени.

7. Проверка предложенных методов математического описания СКВ на аналоговых и физических моделях, а также на промышленных объектах подтвердила их повышенную адекватность по сравнению с существующими методами и целесообразность их использования для целей оптимизации. Применение оптимальных законов при разработке регуляторов позволило улучшить качество управления по основным показателям свободного и вынужденного движения АСР, что было подтверждено при внедрении опытных образцов оптимальных АСР.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Никульча И.П., Беспалов И.Н. Оптимальное по быстродействию управление температурой в системах кондиционирования воздуха. - "Холодильная техника", 1974, № II, с.31-34.

2. Никульча И.П., Беспалов И.Н. Обобщенная модель микроклимата в кондиционируемом помещении. - В сб.: "Тезисы докладов УИ научно-технического совещания по кондиционированию воздуха", Тбилиси, 1977, с.180-181.

3. Беспалов И.Н., Никульча И.П. Оптимизация управления статистическими методами. - Там же, с.186-187.

4. Беспалов И.Н., Никульча И.П. Автоматизированная система кондиционирования воздуха в мукомольных мельницах.- В сб.: Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Научно-технический прогресс в зерноперерабатывающей промышленности". Одесса, 1977, с. 76-77.

5. Никульча И.П., Беспалов И.Н. Метод учета пространственного распределения параметров воздуха при математическом описании кондиционируемого помещения.- В сб.: "Вентиляция и кондиционирование воздуха", вып.10, Рига, 1978, с.118-126.

6. Инженерный метод расчета динамики термокамер для испытательной судовой аппаратуры.- В сб.: "Кибернетика на морском транспорте", вып.6, Киев-Одесса, 1976, с.36-40. Авторы: Бундюк А.Н., Никульча И.П., Бурдо О.Г., Беспалов И.Н.

7. Никульча И.П., Беспалов И.Н. Применение моделирования и теории подобия для исследования процессов в ионизированном воздухе при его движении по воздуховоду.- В сб.: "Ионизация, аэрозоли, электрометрия". Уч. записки ТТУ, вып.10 (479), Тарту, 1979, с.62-76.

8. Беспалов И.Н., Никульча И.П. Управление ионизационным состоянием воздуха в помещениях.- В сб.: "Автоматизация управления производственными процессами (проектирование, моделирование, оптимизация)". Предпринт 78-74, ИК АН УССР, Киев, 1978, с.17-26