

УДК 664.857.53.09

**АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ ЭКСТРАКЦИИ**



**ANALYSIS OF THE FUNCTIONING OF THE DIGITAL SYSTEM
GAS-LIQUID EXTRACTION PROCESS CONTROL**

Касьянов Геннадий Иванович

доктор технических наук, профессор,
Кубанский государственный
технологический университет

Гафуров Карим Хакимович

кандидат технических наук, (PhD),
Бухарский инженерно-технологический институт,
г. Бухара, Узбекистан

Сиддиков Илхомжон Хакимович

доктор технических наук, профессор,
Ташкентский государственный
технический университет имени Ислама Каримова,
г. Ташкент, Узбекистан

Файзиев Шавкат Исматович

доктор философии
(PhD) по техническим наукам

Савин Владимир Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
Кубанский государственный университет

Аннотация. В настоящее время на перерабатывающих предприятиях СНГ выполняются комплексные программы рационального использования вторичных ресурсов сельскохозяйственного производства. К перспективным технологиям получения пищевых добавок из вторичного сырья относится экстракция сжиженными и сжатыми газами. Цель исследования – анализ функционирования цифровой системы управления процессом газожидкостной экстракции. Создана математическая модель, определяющая зависимость поведения плоской частицы в квазислоях, в контакте с экстрагентом. Выявлена зависимость коэффициента диффузии от продолжительности процесса газожидкостной экстракции. Разработана функциональная схема системы автоматического управления процессом экстракции. На основе полученных уравнений для расчета компенсаторов разработан алгоритм поиска настроечных параметров управляющей части многомерной цифровой системы управления, позволяющий обеспечить высокое быстродействие и точность многомерной цифровой системы управления.

Ключевые слова: диоксид углерода; экстракция; гидромодуль; математическая модель, уравнение регрессии, управление процессом экстракции.

Kasyanov Gennady Ivanovich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Kuban State Technological University

Gafurov Karim Khakimovich

Candidate of Technical Sciences, (PhD),
Bukhara Engineering
Technological Institute,
Bukhara, Uzbekistan

Siddikov Ilkhomjon Khakimovich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Tashkent State Technical University
named after Islam Karimov,
Tashkent, Uzbekistan

Fayziev Shavkat Ismatovich

Doctor of Philosophy
(PhD) in Technical Sciences

Savin Vladimir Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Kuban State University

Annotation. At present, the processing enterprises of the CIS are carrying out comprehensive programs for the rational use of secondary resources of agricultural production. Extraction with liquefied and compressed gases is one of the promising technologies for the production of food additives from secondary raw materials. The aim of the research is to analyze the functioning of the digital control system for the gas-liquid extraction process. A mathematical model has been created that determines the dependence of the behavior of a plane particle in quasi-layers in contact with an extractant. The dependence of the diffusion coefficient on the duration of the gas-liquid extraction process has been revealed. A functional diagram of a system for automatic control of the extraction process has been developed. On the basis of the obtained equations for calculating compensators, an algorithm for searching the tuning parameters of the control part of a multidimensional digital control system has been developed, which makes it possible to ensure high speed and accuracy of a multidimensional digital control system.

Keywords: carbon dioxide; extraction; hydronic module; mathematical model, regression equation, extraction process control.

Сельское хозяйство Республики Узбекистан развивается ускоренными темпами. В 2020 г. было выращено около 13,6 млн т овощей, 4,5 млн т фруктов, 1,6 млн т винограда, 0,8 млн т абрикоса, 1,2 млн т яблок. При переработке этих культур остается значительное количество выжимки и других видов вторичных ресурсов. Поэтому в Республике остро стоит вопрос привлечения высоких технологий для переработки вторичных сельскохозяйственных ресурсов.

Существующие способы и устройства для газожидкостной экстракции

К числу таких технологий относится способ извлечения ценных компонентов из семян и выжимки плодов с помощью жидкого и флюидного диоксида углерода [1]. Специалисты Бухарского инженерно-технологического института, совместно с российскими коллегами, разработали варианты аппаратного оформления процесса CO_2 -экстракции [2, 3]. Большие перспективы имеет освоение способа экстрагирования веществ из сырья диоксидом углерода в сверхкритических условиях [4]. Этот способ обработки сырья при давлении насыщенных паров растворителя 40 МПа и температуре 50 °С, позволяет получать выход экстрактивных веществ в 1,5–2,0 раза выше, по сравнению с докритическим способом при давлении 6,4 МПа и температуре 25 °С.

Специалисты российской фирмы «НПП Плазма К» разработали установки и режимы обработки сырья диоксидом углерода [5–7]. Специалисты Ташкентского государственного технического университета им. Ислама Каримова предложили способ имитационного моделирования системы управления экстракционным процессом на основе синергетического подхода [8]. В КубГТУ предложили варианты автоматического управления проведением газожидкостной экстракции с целью оптимизации производственных процессов [9]. Важную роль в совершенствовании экстракционных технологий играют способы математического моделирования и исследовании систем управления процессом экстракции растительного сырья сжиженным углекислым газом [10].

Снизить энергетические затраты на организацию процесса газожидкостной экстракции удалось с помощью разработки человеко-машинного интерфейса для теплового насоса CO_2 -экстракционной установки [11]. Интенсифицировать процесс суб- и сверхкритической экстракции компонентов из сырья, стало возможным за счет использования электромагнитного поля низкой частоты и ультразвука [12]. Внимание исследователей привлечено к обеспечению безопасности процесса газожидкостной экстракции способами системного анализа [13].

В последние годы продолжается поиск перспективных сырьевых источников для получения концентратов БАВ [14]. Практически осуществлен переход от лабораторного этапа исследований в области сверхкритических флюидных технологий к промышленному внедрению [15].

Обзор научно-технической литературы подтвердил перспективность проведения исследований в области математического планирования процесса газожидкостной экстракции.

Цель исследования – анализ функционирования цифровой системы управления процессом извлечения ценных компонентов из масличного сырья жидким диоксидом углерода.

К основным свойствам процесса газожидкостной экстракции, с учетом детерминантно-стохастической природы массообменных процессов, относится взаимодействие в системе «твердое тело-жидкость», характеризующееся изменением средней концентрации экстрактивных веществ, извлекаемых из каждой частицы сырья.

Предназначенное для переработки масличное сырье проходит обязательные стадии предварительной подготовки: инспекцию, удаление нежелательных примесей, измельчение, лепесткование, загрузку в сетчатые кассеты и помещение в экстрактор. Процесс экстракции организован при давлении 5085–6436 кПа и температуре от 15 до 25 °С.

На рисунке 1 приведена аппаратная схема получения экстрактов в субкритическом режиме.

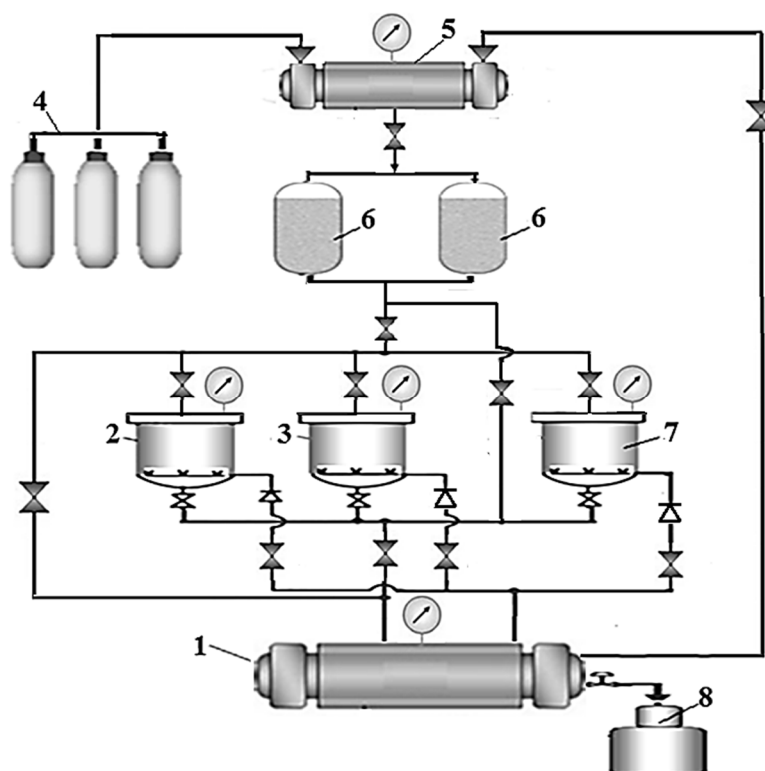


Рисунок 1 – Аппаратурная схема субкритической экстракционной установки:
 1 – испаритель; 2, 3 – экстракторы; 4 – рампа с баллонами CO₂;
 6 – емкости-накопители жидкого CO₂; 7 – пульсатор; 8 – сборник экстракта

Разработка математической модели процесса газожидкостной экстракции

Создание математической модели, показывающей зависимость поведения плоской частицы в квазислоях, непосредственно соприкасающихся с экстрагентом, описывается уравнением массообмена между твердой фазой масляного сырья (G_0) и количеством масла в его составе и разницы между количеством шрота ($G_{ш}$) и остаточного масла в шроте имеет следующий вид:

$$G_0 - G_0 \times a_0 = G_{ш} - G_{ш} \times a,$$

где a_0 – начальная маслячность сырья, a – маслячность шрота.

При этом количество масла (G_M), переходящего в жидкую фазу определяется разностью между количеством исходного сырья и шрота:

$$G_M = G_0 \times a_0 - G_{ш} \times a \text{ или } G_M = G_0 \cdot a_0 - G_0 \frac{1 - a_0}{1 - a} \cdot a.$$

В соответствии с уравнением материального баланса процесса экстракции, в системе «твердое тело-жидкость» изменения содержания масла в экстрагенте определяется по формуле:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{V\rho} (Ly_0 - Ly + G_M),$$

где L , V и ρ – количество, объем и плотность экстрагента в жидкой фазе; y – концентрация масла в мисцелле; y_0 – начальная концентрация в экстрагенте.

Так как в качестве экстрагента используется углекислый газ, то его масса определяется по формуле:

$$L = L_0 \cdot \frac{1 - y_0}{1 - y},$$

где L_0 – начальное значение экстрагента.

В результате получим математическое описание изменения концентрации масла в жидкой фазе:

$$\frac{dy}{dt} \cdot m = L_0 \cdot \left(y_0 - \frac{1 - y_0}{1 - y} y \right) + G_M = L_0 \cdot \left(y_0 - \frac{1 - y_0}{1 - y} y \right) + G_0 \cdot \left(a_0 - \frac{1 - a_0}{1 - a} \cdot a \right),$$

где m – масса масла.

Применяя преобразование Лапласа, получим:

$$y \cdot m = \frac{1}{P} \cdot \left[L_0 \cdot \left(y_0 - \frac{1 - y_0}{1 - y} y \right) + G_M \right] = \frac{L_0}{P} \cdot \left[\left(y_0 - \frac{1 - y_0}{1 - y} y \right) + G_0 \cdot \left(a_0 - \frac{1 - a_0}{1 - a} \cdot a \right) \right].$$

В статическом режиме концентрация в жидкой фазе имеет вид:

$$y = \frac{L_0 y_0 + G_M}{G_M + L}.$$

Для анализа внутренних свойств процесса экстракции растительного сырья разработана компьютерная модель среднего квазислоя частицы сырья. Для определения критических значений процесса экстракции в качестве исходных данных взяты предельно допустимые значения давления углекислого газа как экстрагента и его температуры.

В результате эксперимента определено влияние коэффициента диффузии на интенсивность массопереноса. Эксперимент показал, что, при значении коэффициента диффузии $D = 4,5 \times 10^{-12}$ м²/с, продолжительность экстракции составляет 600 сек, при этом масличность сырья уменьшается с 15 % до 3 % (рис. 2 а, синяя линия), а концентрация мисцеллы увеличивается (рис. 2 а, красная линия).

Разработана статистико-математическая модель процесса экстракции растительного сырья со сжиженным углекислым газом с использованием метода планирования эксперимента, в результате которого получено уравнение регрессии в виде:

$$y = 8,28 + 0,09x_1 - 0,08x_2 + 0,16x_3 + 0,09x_1^2 + 0,09x_2^2 + 0,19x_3^2 - 0,10x_2x_3.$$

Для определения оптимальных значений сформулировано математическое описание задачи оптимизации в виде:

$$y = f(x_1; x_2) \rightarrow \max$$

$$6,5 \text{ МПа} \leq x_1 \leq 7,5 \text{ МПа} \quad 30 \text{ }^\circ\text{C} \leq x_2 \leq 40 \text{ }^\circ\text{C},$$

где x_1 – давление в экстракторе, x_2 – температура в экстракторе.

Разработка алгоритма оптимизации процесса газожидкостной экстракции с применением модифицированного симплексного планирования с постоянно-переменным шагом.

Для поиска оптимальных значений управляемых параметров, в нашем случае давление и температура экстрагента, подаваемые на вход экстрактора, разработан алгоритм поиска оптимизации с применением модифицированного симплексного планирования с постоянно-переменным шагом. В результате найдены оптимальные значения давления $P = 7,25$ МПа, температура $T = 32$ °С экстрагента.

Разработанный алгоритм поиска можно использовать для решения задачи определения оптимальных режимов работы технологического агрегата в различных производственных ситуациях. Разработана возможность управления технологическими параметрами процесса экстракции растительного сырья сжиженным углекислым газом (рис. 2).

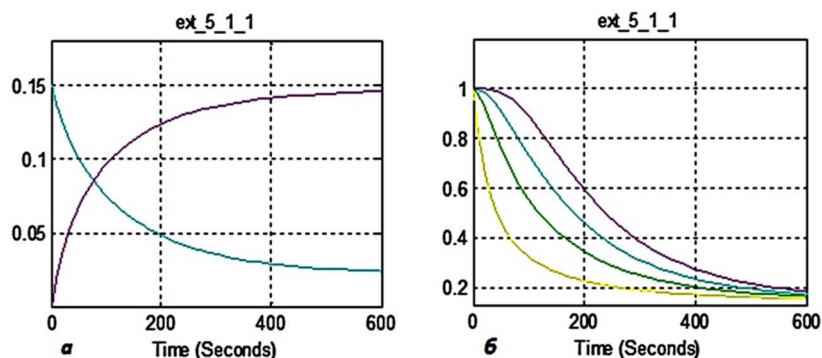


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента диффузии от продолжительности процесса экстракции

Коэффициент диффузии $D = 4,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ (а) зависит от концентрации экстрагируемых веществ в квазислоях (б).

Решена задача непосредственного управления технологическими параметрами.

Разработка функциональной схемы системы автоматического управления процессом экстракции

Целесообразность компенсации взаимного влияния параметров на ход процесса связана с тем, что наличие взаимосвязанности каналов передач существенно усложняет решение задачи синтеза системы управления. В этом случае возникает необходимость компенсировать взаимовлияние переменных, обеспечивая автономность контуров управления и придавая необходимые динамические свойства устойчивости системы управления. Автономность каналов управления обеспечивается за счет ввода компенсирующих устройств, позволяющих уменьшить взаимовлияние перекрестных каналов связи.

В этом случае матрица передаточных функций замкнутой системы, с учетом матричных представлений передаточных функций компенсирующих устройств $W_k(p)$ и регуляторов $W_p(p)$, определяется следующим образом:

$$\bar{y} = (I + W_o^u \cdot W_k^u \cdot W_p^u)^{-1} \cdot W_o^u \cdot W_k^u \cdot W_p^u \cdot y^3,$$

где I – единичная матрица $r \times r$; y^3 – задания для каждого канала управления.

На рисунке 3 показана функциональная схема системы автоматического управления процессом газожидкостной экстракции.

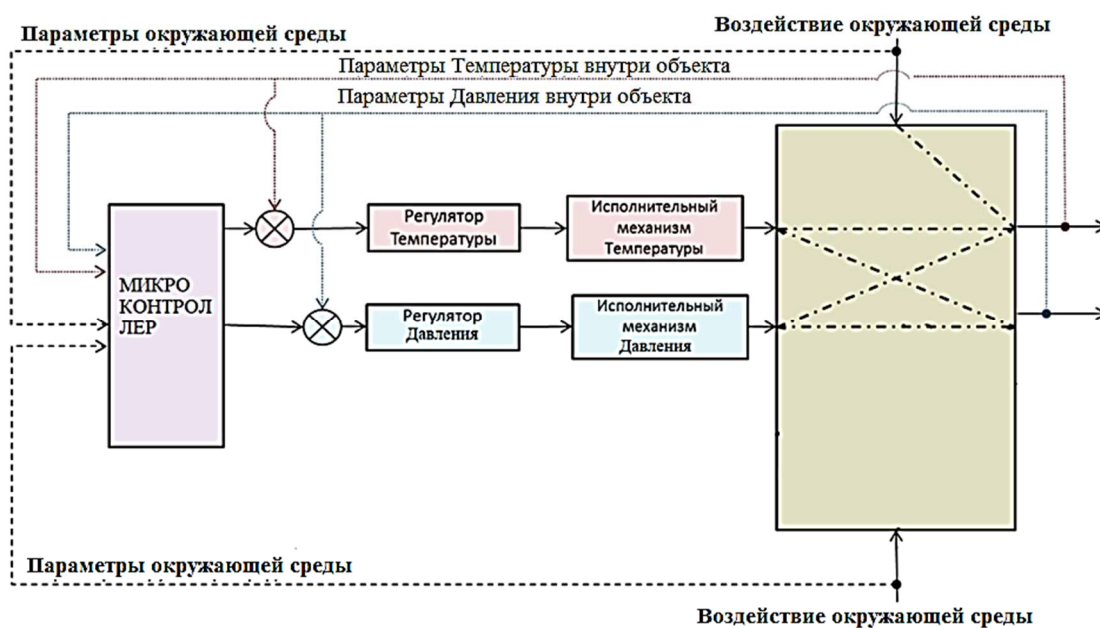


Рисунок 3 – Функциональная схема системы автоматического управления процессом экстракции

Условие автономности каналов связи обеспечивается при диагональности матрицы $(I + W_o^u \cdot W_k^u \cdot W_p^u)$. Так как I – единично-диагональная матрица, то произведение $(W_o^u \cdot W_k^u \cdot W_p^u)$ также будет диагональной:

$$R = W_o^u \cdot W_k^u \cdot W_p^u,$$

где R – диагональная матрица, $diag[R] = diag[W_o^u \cdot W_k^u \cdot W_p^u]$.

Передаточная функция W_p^u – диагональная матрица, в этом случае матрица R будет диагональной при условии, что произведение $(W_o^u \cdot W_k^u)$ также является диагональной матрицей. Умножая эти две матрицы, получим:

$$W_o^u \cdot W_k^u = \begin{bmatrix} W_o^{u[1][1]}(z) + \sum_{i=2}^r W_o^{u[i][1]}(z) \cdot W_k^{u[t][i]}(z) & \dots & W_o^{u[r][1]}(z) + \sum_{i=2}^{r-1} W_o^{u[i][1]}(z) \cdot W_k^{u[r][i]}(z) \\ W_o^{u[1][2]}(z) + \sum_{i=2}^r W_o^{u[i][2]}(z) \cdot W_k^{u[t][i]}(z) & \dots & W_o^{u[r][2]}(z) + \sum_{i=2}^{r-1} W_o^{u[i][2]}(z) \cdot W_k^{u[r][i]}(z) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ W_o^{u[1][r]}(z) + \sum_{i=2}^r W_o^{u[i][r]}(z) \cdot W_k^{u[t][i]}(z) & \dots & W_o^{u[r][r]}(z) + \sum_{i=2}^{r-1} W_o^{u[i][r]}(z) \cdot W_k^{u[r][i]}(z) \end{bmatrix}.$$

Приравнявая к нулю недиагональные элементы перемноженной матрицы, получим:

$$W_o^u \cdot W_k^u + W_o^{uu} = 0,$$

$$W_o^u = \begin{bmatrix} W_o^{u[1]} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & W_o^{u[r]} \end{bmatrix}; W_k^u = \begin{bmatrix} W_k^{u[1]} \\ \vdots \\ W_k^{u[r]} \end{bmatrix}; W_o^{uu} = \begin{bmatrix} W_o^{uu[1]} \\ \vdots \\ W_o^{uu[r]} \end{bmatrix};$$

где $W_o^{u[1]}$ – диагональная матрица, элементы которой определяются вычеркиванием i -ой строки и i -го столбца матрицы W_o^u ; элементы вектора $W_k^{u[1]}$ получаются вычеркиванием из i -го столбца i -ой строки матрицы W_k^u ; элементы вектора $W_o^{uu[1]}$, получаемого из i -го столбца, определяется вычеркиванием i -ой строки матрицы W_o^u .

При выполнении условия невырожденности матрицы W_o^u , уравнение имеет единственное решение:

$$W_k^u = (W_o^u)^{-1} \cdot W_o^{uu}.$$

Тогда передаточная функция динамического компенсатора в матричном виде определяется по формуле:

$$W_k(p) = W_o^{-1}(p) \cdot diag W_o(p).$$

Применяя методы теории одномерных систем, можно найти передаточные функции регулятора по каждому каналу управления с использованием полученной диагональной передаточной матрицы замкнутой системы управления.

На основе полученных уравнений для расчета компенсаторов разработан алгоритм поиска настроечных параметров управляющей части многомерной цифровой системы управления, позволяющий обеспечить высокое быстродействие и точность мно-

гомерной цифровой системы управления и автоматизировать процесс решения задачи синтеза многомерных цифровых систем управления, имеющих различные структуры.

Процесс нахождения оптимальных значений настроечных параметров цифровых регуляторов начинается с расчета переходных процессов замкнутой многомерной системы компьютерного управления.

Расчет переходных процессов замкнутой многосвязной системы цифрового управления осуществляется с учетом как основных, так и перекрестных связей объекта с помощью разностных уравнений в следующем виде:

$$E_1 = Y_1^3 - Y_1, U_1^u = \theta^u \cdot \sigma^u, U_1 = I^u \cdot U_1^u, \theta_1^u = \theta_{o1}^u \cdot \sigma_{o1}^u, Y_1 = I_{o1}^u \cdot Y_1^u,$$

где U_1^u, E_1, Y_1^3 – вектор значений управляющих воздействий, вектор ошибки управления, вектор заданий соответственно;

$$\theta^{[m,l]} = \begin{cases} \left[u_{i-1}^{[m,l]}, \dots, u_{i-n^{u[m,l]}}^{[m,l]}, u_{l-d^{u[m,l]}}^{[m,l]}, \dots, u_{i-k^{u[m,l]}-d^{u[m,l]}}^{[m,m]} \right], m \neq l \\ \left[u_{i-1}^{[m,l]}, \dots, u_{i-n^{u[m,l]}}^{[m,l]}, e_i^{[m]}, \dots, e_{i-k^{u[m,m]}}^{[m,m]} \right], m = l \end{cases} \quad \text{– значения пере-}$$

менных состояния регуляторов, включающие настроечные параметры регуляторов

$$\sigma^{[m,l]} = \left[g_1^{[m,l]}, \dots, g_{n^{u[m,l]}}^{[m,l]}, r_0^{[m,l]}, \dots, r_{k^{u[m,l]}}^{[m,l]} \right]^T; U_1 = \left[u_i^{[1]}, \dots, u_i^{[r]} \right]^T \quad \text{– оптимальные зна-}$$

чения управляющих воздействий; $I = I_{o1} = I_o$ – матрицы суммирования; $Y_1^u = Y^u$ –

значения выходов каналов связи; $\theta_{o1} = \theta_o$ – матричное представление переменных состояния каналов связи; $\sigma_{o1} = \sigma_o$ – параметры каналов моделей связей; $Y_1 = Y$ – вектор выходов объекта управления.

При синтезе системы управления для определения оптимальных управляющих воздействий в качестве критерия качества переходных процессов использовался квадрат управления, значение которого при настройке регуляторов минимизировалось:

$$F = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{L+J} U_j^2(i) \rightarrow \min; (j = \overline{1, M}; i = \overline{1, J}).$$

При поиске оптимальных управляющих воздействий процессом экстракции по критерию быстродействия, необходимо определить минимально возможное число тактов перевода в соответствии с теоремой об N -интервалах по формуле:

$$L = \text{Int} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P_{ij} / M + 0.5 \right\},$$

где P_{ij} – порядок передаточной функции (дифференциального уравнения) j -го входа i -го выхода канала объекта управления; M – количество выходов; N – количество входов.

Требуемое состояние объекта управления определяется условием:

$$Y_i(L + K) = G_i(L + K) - Y_i^*(L + K), i = \overline{1, N}; K = \overline{0, \tilde{N}_i},$$

где $Y_i^*(L + K)$ – прогнозируемое значение i -й выходной переменной; $G_i(L + K)$ – требуемое значение i -й выходной переменной.

В случае нулевых начальных условий эти зависимости будут иметь вид:

$$Y_i(L+K) = \sum_{j=1}^M \sum_{m=1}^L U_j(m) * \omega_{ij}((L+K-m+1) * T), i = \overline{1, N}; K = \overline{0, C_i},$$

где T – период дискретизации управляющего сигнала; C_i – число тактов фиксации i -й выходной переменной; $\omega((L-K)T)$ – значение весовой функции (реакции на импульс длительности T) в $L-K$ -м такте.

На основе динамических моделей процесса с учетом условий оптимальности, используя метод наименьших квадратов получим систему линейных алгебраических уравнений:

$$[\omega_{ij}(L+K-m+1)] * U_j(m) = G_i(L+K) - Y_i^*(L+K).$$

Решив системы линейных уравнений, находим искомые значения управляющих воздействий в виде линейных комбинаций прогнозируемых ошибок:

$$U_j(m) = \sum_{i=1}^N \sum_{K=0}^{C_1} R_{im} (\sum_{s=1}^{i-1} C_s + K) * E_i(L+K),$$

где R_{im} – вектор-строка матрицы $W(p)^{-1}$.

Таким образом, эквивалентная импульсная передаточная функция цифрового регулятора определяется по формуле:

$$D(z) = \frac{U(z)}{e(z)} = \sum_{j=0}^n K_j e(jT) z^{-j} / \sum_{j=0}^n e(jT) z^{-j},$$

где K_j – коэффициент усиления на j -м такте управления.

В работе для определения настроечных оптимальных параметров регуляторов многомерного цифрового управляющего устройства предложен высокоэффективный алгоритм вычисления, учитывая длительность импульсных управляющих воздействий, вырабатываемых микроконтроллером в соответствии с заданным критерием, представляемый векторной оптимизацией.

Выводы

Создана математическая модель, определяющая зависимость поведения лепесткового масличного сырья в квазислоях, в контакте с жидким диоксидом углерода. Выявлена зависимость коэффициента диффузии от продолжительности процесса CO_2 -экстракции. Разработана функциональная схема автоматического управления процессом экстракции. Получены уравнения для расчета компенсаторов и разработан алгоритм поиска настроечных параметров управляющей части многомерной цифровой системы управления, позволяющий обеспечить высокое быстродействие и точность многомерной цифровой системы управления.

Анализ функционирования цифровой системы управления процессом экстракции показал, что созданная система обладает высоким быстродействием, меньшей чувствительностью к погрешностям измерения и меньшей ошибкой регулирования.

Литература

1. Гафуров К.Х. Применение технологии CO_2 -экстракции для растительного сырья Узбекистана / К.Х. Гафуров, Б.Т. Мухаммадиев, Ш.И. Мирзаева // В сборнике: Технологические особенности производства и применения CO_2 -экстрактов из растительного сырья. Сборник материалов международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 45–47.

2. Гафуров К.Х. Аппаратурное оформление процесса экстракции сверхкритической CO₂ / К.Х. Гафуров, Б.Т. Мухаммадиев, Ш.У. Мирзаева; Отв. за вып. А.А. Нестеренко // В сборнике: Современные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции. Сборник статей по материалам V Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию кафедры технологии хранения и переработки животноводческой продукции Кубанского ГАУ. – 2019. – С. 394–399.
3. Гафуров К.Х. Установка для экстракции биологического сырья / К.Х. Гафуров, У.М. Ибрагимов, Б.Б. Муслимов // Universum: Технические науки: электрон. научн. журн. – 2019. – № 7(64). – URL : <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/7591>
4. Джураев Х.Ф. Сравнительный анализ влияния давления и температуры на процесс сверхкритической CO₂-экстракции растительного сырья / Х.Ф. Джураев [и др.] // Бутлеровские сообщения. – 2018. – Т. 55. – № 7. – С. 109–113.
5. Занин Д.Е. Разработка адаптивной системы управления процессами извлечения флавоноидов из растительного сырья / Д.Е. Занин, Д.Г. Касьянов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2021. – № 2. – С. 69–77.
6. Занин Д.Е. Установка для экстракции растительного сырья / Д.Е. Занин, Д.Г. Касьянов, Е.А. Метельская. Патент на изобретение RU № 2701856, Заявка № 2019100143, заявлено 09.01.2019, опубликовано 01.10.2019.
7. Занин Д.Е. Экстрактор для извлечения биологически активных компонентов из растительного сырья / Д.Е. Занин, Д.Г. Касьянов, Е.А. Метельская. Патент на полезную модель RU № 160667, Заявка № 2015135817/05, заявлено 24.08.2015, опубликовано 27.03.2016.
8. Сиддииков И.Х. Имитационное моделирование системы управления динамическим объектом на основе синергетического подхода / И.Х. Сиддииков, Ю.А. Жукова // Автоматизация. Современные технологии. – 2018. – Т. 72. – № 1. – С. 25–27.
9. Сязин И.Е. Автоматизированные системы CO₂-технологий / И.Е. Сязин [и др.]. – Краснодар : Экоинвест, 2021. – 110 с.
10. Файзиев Ш.И. Моделирование и исследование системы управления процессом экстракции растительного сырья сжиженным углекислым газом : автореф. дис. ... д-ра философии (PHD) по техническим наукам. Спец. 05.01.08 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами. – Ташкент, 2020. – 48 с.
11. Шарипов О.О. Разработка человеко-машинного интерфейса для теплового насоса CO₂-экстракционной установки / О.О. Шарипов, К.Х.Гафуров, Ш.И. Файзиев // Современные материалы, техника и технологии. – 2017. – № 1(9). – С. 232–238.
12. Яралиева З.А. Суб и сверхкритическая экстракция компонентов из сырья с использованием электромагнитного поля низкой частоты и ультразвука / З.А. Яралиева, Д.Г. Касьянов // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. – 2021. – № 1(66). – С. 23–28.
13. Aleshkevich Y.S. System analysis and safety of the process to obtain CO₂-extracts from plants / Y.S. Aleshkevich [et al.] // In the collection: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials. – 2021.
14. Gafurov K. Fruit seeds, seeds of grape and cucurbitaceous – a prospective source of obtaining biologically active substances. overview. Food Science and Technology / K. Gafurov, B. Muslimov. – 2021. – № 15(1).
15. José M. del Valle. Extraction of natural compounds using supercritical CO₂: Going from the laboratory to the industrial application / José M. del Valle // Journal of Supercritical Fluids. – 2015. – Vol. 96. – P. 180–199.

References

1. Gafurov K.K. Application of CO₂-extraction technology for vegetal raw materials of Uzbekistan / K.Kh. Gafurov, B.T. Muhammadiyev, S.I. Mirzaeva // In the collection: Technological features of production and use of CO₂ extracts from vegetal raw materials. Collection of materials of the international scientific and practical conference. – 2018. – P. 45–47.
2. Gafurov K.Kh. Hardware design of the extraction process of supercritical SO₂ / K.KH. Gafurov, B.T. Muhammadiyev, S.U. Mirzaev; Responsible for the issue A.A. Nesterenko//In the collection: Modern aspects of the production and processing of agricultural products. A collection of articles on the materials of the V International Scientific and Practical Conference dedicated to the 15th anniversary of the Department of Technology for the Storage and Processing of Livestock Products of the Kuban State University. – 2019. – P. 394–399.

3. Gafurov K.Kh. Plant for extraction of biological raw materials / K.Kh. Gafurov, U.M. Ibrahymov, B.B. Muslim // *Universum: Technical sciences: electronic scientific journal*. – 2019. – № 7(64). – URL : <http://7universum.com/ru/tech /archive /item/7591>
4. Dzhuraev H.F. Comparative analysis of the effect of pressure and temperature on the process of supercritical CO₂-extraction of plant raw materials / H.F. Dzhuraev [et al.] // *Butler reports*. – 2018. – Vol. 55. – № 7. – P. 109–113.
5. Zanin D.E. Development of an adaptive control system for the extraction of flavonoids from plant raw materials / D.E. Zanin, D.G. Kasyanov // *Science. Technology. Technologies (Polytechnic Bulletin)*. – 2021. – № 2. – P. 69–77.
6. Zanin D.E. Plant for extraction of plant raw materials / D.E. Zanin, D.G. Kasyanov, E.A. Metelskaya. The patent for the invention of RU № 2701856, Application № 2019100143, it is declared 09.01.2019, published 01.10.2019.
7. Zanin D.E. Extractor for extraction of biologically active components from plant raw materials / D.E. Zanin, D.G. Kasyanov, E.A. Metelskaya. Patent for utility model RU № 160667, Application № 2015135817/05, declared 24.08.2015, published 27.03.2016.
8. Siddikov I.K. Simulation of the dynamic object control system based on a synergistic approach / I.K. Siddikov, Yu.A. Zhukova // *Automation. Co-time technology*. – 2018. – Vol. 72. – № 1. – P. 25–27.
9. Syazin I.E. Automated CO₂-technology systems / I.E. Xiazin [et al.]. – Krasnodar : Ecoinvest, 2021. – 110 p.
10. Fayziev Sh.I. Modeling and research of the system for controlling the process of extraction of plant raw materials with liquefied carbon dioxide : autorec. of the dis. ... Ph.D. (PHD) in technical sciences. special. 05.01.08 – Automation and control of technological processes and production. – Tashkent, 2020. – 48 p.
11. Sharipov O.O. Development of man-machine interface for heat pump of CO₂-extraction plant / O.O. Sharipov, K.H. Gafurov, S.I. Fayziev // *Modern materials, technology and technology*. – 2017. – № 1(9). – P. 232–238.
12. Yaraliyeva Z.A. Sub and supercritical extraction of components from raw materials using low frequency electromagnetic field and ultrasound / Z.A. Yaraliyeva, D.G. Kasyanov // *Technology and commodity science of innovative food products*. – 2021. – № 1(66). – P. 23–28.
13. Aleshkevich Y.S. System analysis and safety of the process to obtain CO₂-extracts from plants / Y.S. Aleshkevich [et al.] // In the collection: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials*. – 2021.
14. Gafurov K. Fruit seeds, seeds of grape and cucurbitaceous – a prospective source of obtaining biologically active substances. overview. *Food Science and Technology* / K. Gafurov, B. Muslimov. – 2021. – № 15(1).
15. José M. del Valle. Extraction of natural compounds using supercritical CO₂: Going from the laboratory to the industrial application / José M. del Valle // *Journal of Supercritical Fluids*. – 2015. – Vol. 96. – P. 180–199.