

УДК 664.012

**СИНТЕЗ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОМБИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ
ВАКУУМ-ВЫПАРНЫМИ УСТАНОВКАМИ**

*канд. техн. наук, доц. М.М. КОЖЕВНИКОВ, С.Н. АДАМОВ
(Могилевский государственный университет продовольствия)*

Предложен метод синтеза комбинированных автоматических систем управления температурой, концентрацией и глубиной вакуума для вакуум-выпарных установок, основанный на линеаризованных моделях динамики. В ходе выполненного анализа определены каналы нанесения возмущающих воздействий и найдены передаточные функции динамических компенсаторов для контуров регулирования температуры, концентрации и вакуума. Предложенный метод позволяет найти передаточные функции динамических компенсаторов в различных режимах работы вакуум-выпарной установки.

Ключевые слова: динамическая модель, комбинированное управление, вакуум-выпарная установка.

На предприятиях химической и пищевой промышленности широко распространено использование вакуум-выпарных установок, обеспечивающих концентрирование различных растворов при их кипении на пониженной температуре. Поддержание режимных параметров в таких установках обычно обеспечивается локальными одноконтурными системами автоматического управления температурой, вакуумметрическим давлением и концентрацией сухих веществ в слабом растворе [1; 2]. При этом управляющие устройства представляют собой цифровые регуляторы, настройка параметров которых производится с использованием упрощенных динамических моделей вакуум-выпарной установки [3; 4].

Существенный недостаток упрощенного подхода заключается в невозможности учета изменений температуры и расхода слабого раствора, подаваемого в установку, а также отклонений вакуумметрического давления. Это приводит к необходимости оперативной корректировки параметров настройки автоматических регуляторов вакуума и температуры при отклонениях нагрузок вакуум-выпарного аппарата. Технологический персонал, проводя корректировки параметров, зачастую существенно повышает тепловые нагрузки, вследствие чего неэффективно используются теплоносители.

В данной статье вакуум-выпарная установка представлена, в виде многомерного объекта автоматического управления, на основе которого реализован метод синтеза комбинированных автоматических систем управления температурой, концентрацией и глубиной вакуума. Предложенный метод позволяет эффективно компенсировать влияние возмущающих воздействий, вызванных колебаниями расхода и температуры слабого раствора на входе в выпарной аппарат, а также изменениями вакуумметрического давления. Разработаны структурные схемы комбинированных систем управления вакуум-выпарной установкой и получены выражения для расчета передаточных функций динамических компенсаторов возмущающих воздействий. Использование таких систем автоматического управления позволит более эффективно использовать теплоносители в вакуум-выпарных установках в химической и пищевой промышленности.

Схема исследованной в данной работе вакуум-выпарной установки с одним контуром представлена на рисунке 1 [1; 2]. На вход выпарного аппарата 1 подается слабый раствор, который затем поступает в греющую камеру 2, под нижнюю трубную решетку, где закипает и начинает поступать в кипятильные трубы. По кипятильным трубам парожидкостная смесь поступает в емкость над трубной решеткой и направляется по циркуляционной трубе 3 в сепаратор 4. Вследствие возникшей при этом центробежной силы происходит разделение вторичного пара и жидкости. Жидкость по циркуляционной трубе 5 поступает назад в греющую камеру, а вторичный пар подается в конденсатор 7. Вторичный пар также используется для подогрева выпарной установки посредством термокомпрессорного блока 6. Воздух и неконденсируемые газы отводятся посредством парэжекторного агрегата 8. В вакуум-выпарной установке имеют место следующие процессы: теплообмен между поверхностью нагрева и слабым раствором, кипение слабого раствора, сепарация пара и разделение жидкости и паров растворителя, конденсация пара.

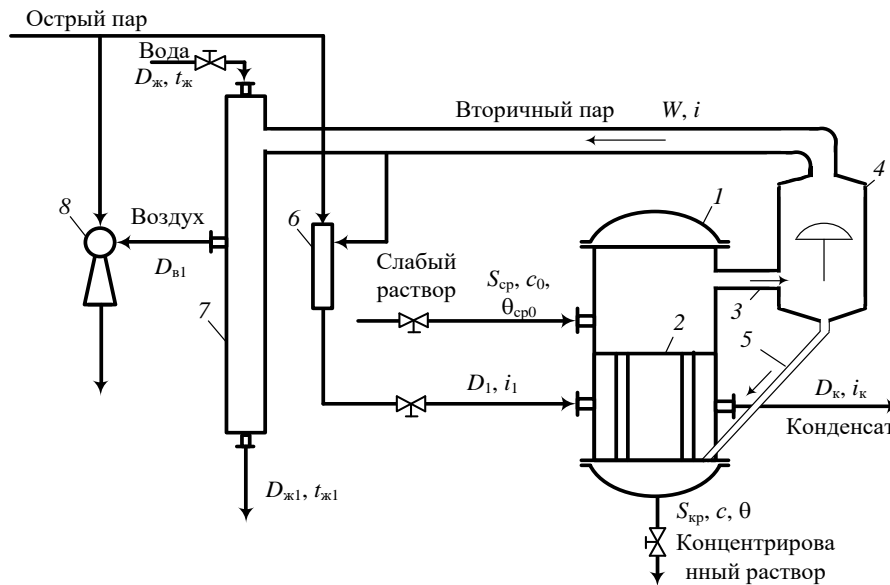


Рисунок 1. – Схема исследованной однокорпусной вакуум-выпарной установки

Представим греющую камеру в виде совокупности таких элементов, как пар в камере, пленка конденсата на поверхности нагрева, неконденсированные газы, конденсат в греющей камере, металлический корпус и изоляция [5]. При составлении модели для греющей камеры предположим что объем греющей камеры и объем пара равны, температуры пленки конденсата и пара изменяются с одинаковой скоростью, греющая камера и изоляция представляют собой сосредоточенные емкости, причем температура изоляции равна $\theta_{и} = (\theta_{м} + \theta_{о}) / 2$, где $\theta_{м}$ – температура корпуса, $\theta_{о}$ – температура внешней среды. Учитывая указанные допущения, тепловой и материальный баланс в греющей камере могут быть представлены в виде

$$p(V\rho_{п} + V_{к}\rho_{к}) = D_1 - D_к - D'_1; \quad (1)$$

$$p(V\rho_{п}u_{п} + V_{к}\rho_{к}c_{к}t_{к}) + (c_{мт}G_{мт} + 0,5c_{и}G_{и})pt_{п} = (D_1 - D'_1)i_1 - D_кi_к - Q_1 - Q', \quad (2)$$

где $p = d/d\tau$ – оператор дифференцирования, где τ – время;

V – объем камеры;

$\rho_{п}$ – плотность пара;

$V_{к}$ – объем конденсата;

$\rho_{к}$ – плотность конденсата;

D_1 – расход пара;

$D_к$ – расход конденсата;

D'_1 – расход пара для удаления неконденсирующихся газов;

$u_{п}$ – энергия пара греющей камеры;

$c_{к}$ – теплоемкость конденсата;

$t_{к}$ – температура конденсата;

$c_{мт}$ – теплоемкость корпуса;

$G_{мт}$ – масса корпуса;

$t_{п}$ – температура пара;

$c_{и}$ – теплоемкость изоляции;

$G_{и}$ – масса изоляции;

i_1 – энтальпия пара;

$i_к$ – энтальпия конденсата;

Q' – потери тепла во внешнюю среду;

Q_1 – тепло, передаваемое поверхности нагрева.

Величину Q_1 определим по уравнению теплопередачи:

$$Q_1 = F_1'(t_n - t_c) / (1/\alpha_1 + \delta_c/2\lambda_c), \quad (3)$$

где F_1' – площадь поверхности со стороны пара;
 α_1 – коэффициент теплоотдачи;
 δ_c – толщина стенки нагреваемой поверхности;
 λ_c – теплопроводность стенки;
 t_c – температура нагреваемой поверхности.

На основе выражений (1)–(3) получим зависимость для описания изменения температуры пара

$$a_1 p t_n = -a_2 t_n + a_3 t_c + a_4 (D_1 - D_1') + a_5, \quad (4)$$

где $a_1 = V(\rho_n \partial u_n / \partial t_n + (u_n - i_k) \partial \rho_n / \partial t_n) + V_{\kappa \rho_{\kappa}} (c_{\kappa} + t_{\kappa} \partial c_{\kappa} / \partial t_n) + c_{\text{мт}} G_{\text{мт}} + 0,5 c_n G_n$;
 $a_2 = a_3 = F_1' / (1/\alpha_1(t_n, t_c) + \delta_c/2\lambda_c)$;
 $a_4 = i_1 - i_k$;
 $a_5 = Q_1$.

Температура поверхности нагрева t_c описывается уравнением [4]

$$c_1 p t_c = -c_2 t_c + a_2 t_n + c_3 \theta, \quad (5)$$

где $c_1 = c_{\text{мт}} G_3$, где G_3 – масса металла окружающего парожидкостное пространство;
 $c_2 = a_2 + c_3$, где $c_3 = F_1'' / (1/\alpha_2(t_c, \theta, b) + \delta_c/2\lambda_c + R_n(\bar{\tau}))$;
 θ – температура кипения слабого раствора;
 F_1'' – площадь поверхности, нагреваемой со стороны слабого раствора;
 α_2 – коэффициент теплоотдачи;
 b – величина концентрации сухих веществ в слабом растворе;
 $R_n(\bar{\tau})$ – величина термического сопротивления накипи;
 $\bar{\tau}$ – время работы выпарной установки после чистки поверхности нагрева.

При использовании уравнения (5) предполагается выполнение условий: трубы испарителя одинаковы по размерам и имеют одинаковые теплофизические свойства, отсутствует тепловой поток вдоль трубы, трубы испарителя получают одинаковое количество тепла, поверхность нагрева представляет собой сосредоточенную емкость [5].

Линеаризуем уравнения (4), (5) и заменим абсолютные значения переменных их приращениями безразмерной формы. Разделим отклонения переменных на соответствующие их величины в состоянии равновесия и выполним преобразование Лапласа: $t_n^* = L(\Delta t_n / t_{n0})$, $t_c^* = L(\Delta t_c / t_{c0})$, $D_1^* = L(\Delta D_1 / D_{10})$, $D_1'^* = L(\Delta D_1' / D_{10}')$, $Q^* = L(\Delta Q / Q_0)$, $\theta^* = L(\Delta \theta / \theta_0)$, $b^* = L(\Delta b / b_0)$, $R_n^* = L(\Delta R_n / R_{n0})$, где L – преобразование Лапласа; Δ – отклонения; индексом 0 обозначены значения переменных в состоянии равновесия. Тогда линеаризованную модель греющей камеры с учетом нулевых начальных условий можно записать в виде

$$t_n^* = W_{11}(s)t_c^* + W_{12}(s)D_1^* + W_{13}(s)D_1'^* + W_{14}(s)Q^*, \quad (6)$$

$$t_c^* = W_{21}(s)t_n^* + W_{22}(s)\theta^* + W_{23}(s)b^* + W_{24}(s)R_n^*, \quad (7)$$

где $W_{ij}(s) = k_{ij} / T_i s + 1$ ($i = 1, 2, j = 1: 4$) – передаточные функции каналов внешних воздействий на греющую камеру;
 k_{ij} – коэффициенты передачи соответствующих каналов греющей камеры;
 T_i – постоянные времени;
 s – комплексная переменная.

Для определения коэффициентов передачи и постоянных времени используются следующие формулы:

$$k_{11} = -l_{12}t_{c0}/l_{11}t_{n0}, \quad k_{12} = -l_{13}D_{10}/l_{11}t_{n0}, \quad k_{13} = -l_{14}D'_{10}/l_{11}t_{n0}, \quad k_{14} = -l_{15}Q'_0/l_{11}t_{n0}, \quad T_1 = -1/l_{11},$$

$$l_{11} = \frac{\partial}{\partial t_n} \left(\frac{a_3 t_c + a_4 (D_1 - D'_1) + a_5 - a_2 t_n}{a_1} \right) \Big|_0, \quad l_{12} = \frac{\partial}{\partial t_c} \left(\frac{a_3 t_c - a_2 t_n}{a_1} \right) \Big|_0,$$

$$l_{13} = \frac{\partial}{\partial D_1} \left(\frac{a_4 D_1}{a_1} \right) \Big|_0, \quad l_{14} = \frac{\partial}{\partial D'_1} \left(\frac{-a_4 D'_1}{a_1} \right) \Big|_0, \quad l_{15} = \frac{\partial}{\partial Q'} \left(\frac{a_5}{a_1} \right) \Big|_0,$$

$$k_{21} = -l_{22}t_{n0}/l_{21}t_{c0}, \quad k_{22} = -l_{23}\theta_0/l_{21}t_{c0}, \quad k_{23} = -l_{24}b_0/l_{21}t_{c0}, \quad k_{24} = -l_{25}R_{n0}/l_{21}t_{c0}, \quad T_2 = -1/l_{21},$$

$$l_{21} = \frac{\partial}{\partial t_c} \left(\frac{a_2 t_n + c_3 \theta - c_2 t_c}{c_1} \right) \Big|_0, \quad l_{22} = \frac{\partial}{\partial t_n} \left(\frac{a_2 t_n - c_2 t_c}{c_1} \right) \Big|_0, \quad l_{23} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{c_3 \theta - c_2 t_c}{c_1} \right) \Big|_0,$$

$$l_{24} = \frac{\partial}{\partial b} \left(\frac{c_3 \theta - c_2 t_c}{c_1} \right) \Big|_0, \quad l_{25} = \frac{\partial}{\partial R_n} \left(\frac{c_3 \theta - c_2 t_c}{c_1} \right) \Big|_0.$$

Подстановка начальных условий $t_{n0}, t_{c0}, D_{10}, D'_{10}, Q'_0, \theta_0, b_0, R_{n0}$ в вышеприведенные формулы после выполнения дифференцирования обозначена символом $|_0$.

Для математического описания парожидкостного пространства использованы допущения: температура кипения слабого раствора θ представляет собой сосредоточенный параметр, равный температуре вторичного пара t , масса пара существенно меньше массы слабого раствора, колебания расхода слабого раствора не превышают $\pm 30\%$, объем слабого раствора равен $V = V'_0 + \eta h$, где V'_0 – начальный объем слабого раствора, η – значение площади поперечного сечения выпарного аппарата, h – уровень слабого раствора в аппарате. Рассмотрим парожидкостное пространство как совокупность следующих элементов: слабый раствор, пар ниже зеркала испарения, вторичный пар, металлический корпус [5; 6]. Материальный и тепловой балансы при этом будут иметь вид

$$(\rho - \rho_n) pV + (V_0 - V)(\partial \rho_n / \partial t) pt = S_{cp} - S_{кр} - W, \quad (8)$$

$$p(V\rho c\theta + (V_0 - V)\rho_n u + c_{мт} \theta G'_{мт}) = Q_2 + S_{cp} c_0 \theta_{cp0} - S_{кр} c\theta - Wi - Q'', \quad (9)$$

где ρ – плотность слабого раствора;

V_0 – величина объема парожидкостного пространства;

S_m – расход слабого раствора, подаваемого в аппарат;

$S_{кр}$ – расход концентрированного раствора, отводимого из аппарата;

W – расход вторичного пара;

i – энтальпия вторичного пара;

c – теплоемкость слабого раствора;

u – внутренняя энергия вторичного пара;

$G'_{мт}$ – масса металла вокруг парожидкостного пространства;

c_0 – теплоемкость слабого раствора на входе в выпарной аппарат;

θ_{cp0} – температура слабого раствора на входе в выпарной аппарат;

Q'' – общие тепловые потери через корпус;

Q_2 – количество тепла, получаемое слабым раствором с поверхности теплообмена.

Значение Q_2 вычислим по уравнению теплопередачи:

$$Q_2 = c_3(t_c - \theta). \quad (10)$$

С учетом выражений (8)–(10) динамика изменения уровня и температуры слабого раствора в выпарном аппарате может быть описана уравнениями вида

$$d_1 p\theta = -d_2\theta + c_3 t_c - d_3 W + d_4, \quad (11)$$

$$e_1 ph = S_{cp} - S_{кр} - W, \quad (12)$$

где $d_1 = V\rho c + (V_0 - V)\rho_n \partial u / \partial t + u(V_0 - V)\partial \rho_n / \partial t + c_{мт} G'_{мт}$;
 $d_2 = c_3 + S_{кр} c$;
 $d_3 = i$;
 $d_4 = S_{cp} c_0 \theta_{cp0} - Q''$;
 $e_1 = (\rho - \rho_n) \eta$.

Линеаризуем (11) и заменим абсолютные значения переменных их приращениями безразмерной формы. С учетом нулевых начальных условий получим

$$\theta^* = W_{31}(s)t_c^* + W_{32}(s)b^* + W_{33}(s)R_n^* + W_{34}(s)S_{кр}^* + W_{35}(s)S_{cp}^* + W_{36}(s)\theta_{cp0}^* ; \quad (13)$$

$$h^* = W_{41}(s)S_{cp}^* - W_{42}(s)S_{кр}^* - W_{43}(s)W^* , \quad (14)$$

где $W_{3i}(s) = k_{3i}/T_3 s + 1$, $W_{4j}(s) = k_{4j}/T_4 s$ ($i = 1:6, j = 1:3$) – передаточные функции для парожидкостного пространства;

k_{3i}, k_{4j} – коэффициенты передачи для парожидкостного пространства;

T_3, T_4 – постоянные времени для парожидкостного пространства.

Для определения коэффициентов передачи и постоянных времени используются следующие формулы:

$$k_{31} = -l_{32} t_{c0} / l_{31} \theta_0, \quad k_{32} = -l_{33} b_0 / l_{31} \theta_0, \quad k_{33} = -l_{34} R_{n0} / l_{31} \theta_0, \quad k_{34} = -l_{35} S_{cp0} / l_{31} \theta_0, \quad k_{35} = -l_{36} S_{cp0} / l_{31} \theta_0,$$

$$k_{36} = -l_{37} \theta_{cp00} / l_{31} \theta_0, \quad T_3 = -1 / l_{31}, \quad k_{41} = 1, \quad k_{42} = S_{кр0} / S_{cp0}, \quad T_4 = e_1 h_0 / S_{cp0},$$

$$l_{31} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{c_3 t_c - d_3 W + d_4 - d_2 \theta}{d_1} \right) \Big|_0, \quad l_{32} = \frac{\partial}{\partial t_c} \left(\frac{c_3 t_c - d_2 \theta}{d_1} \right) \Big|_0, \quad l_{33} = \frac{\partial}{\partial b} \left(\frac{c_3 t_c - d_3 W + d_4 - d_2 \theta}{d_1} \right) \Big|_0,$$

$$l_{34} = \frac{\partial}{\partial R_n} \left(\frac{c_3 t_c - d_2 \theta}{d_1} \right) \Big|_0, \quad l_{35} = \frac{\partial}{\partial S_{кр}} \left(\frac{-d_2 \theta}{d_1} \right) \Big|_0, \quad l_{36} = \frac{\partial}{\partial S_{cp}} \left(\frac{d_4}{d_1} \right) \Big|_0, \quad l_{37} = \frac{\partial}{\partial \theta_{cp0}} \left(\frac{d_4}{d_1} \right) \Big|_0.$$

Подстановка начальных условий $\theta_0, t_{c0}, b_0, R_{n0}, S_{cp0}, \theta_0, \theta_{cp00}$ в вышеприведенные формулы после выполнения дифференцирования обозначена символом $|_0$.

Анализ выражений (6), (7), (13), а также конструктивных особенностей рассматриваемой вакуум-выпарной установки, позволяет выделить в качестве управляющего воздействия на температуру кипения слабого раствора θ расход пара D_1 и использовать для реализации замкнутой системы управления с отрицательной обратной связью ПИД-регулятор с передаточной функцией $R_1(s)$ (рисунок 2). При этом возмущающие воздействия, вызванные колебаниями расходов слабого S_{cp} и концентрированного растворов $S_{кр}$, могут быть полностью скомпенсированы введением соответствующих динамических компенсаторов с передаточными функциями $W_{1k}(s)$ и $W_{2k}(s)$. Управляющее воздействие в такой комбинированной автоматической системе будет определяться следующим образом:

$$D_1^* = R_1(s) \left(\theta_g^* + W_{1k}(s) S_{cp}^* + W_{2k}(s) S_{кр}^* - \theta^* \right), \quad (15)$$

где θ_g^* – величина задающего воздействия по температуре кипения слабого раствора.

Передаточные функции динамических компенсаторов определим, применив к (6), (7), (13) и (15) условие полной инвариантности системы автоматического управления к возмущениям S_{cp}^* , S_{kp}^* :

$$W_{1k}(s) = W_{35}(s)(W_{11}(s)W_{21}(s) - 1) / R_1(s)W_{12}(s)W_{21}(s)W_{31}(s), \tag{16}$$

$$W_{2k}(s) = W_{34}(s)(W_{11}(s)W_{21}(s) - 1) / R_1(s)W_{12}(s)W_{21}(s)W_{31}(s). \tag{17}$$

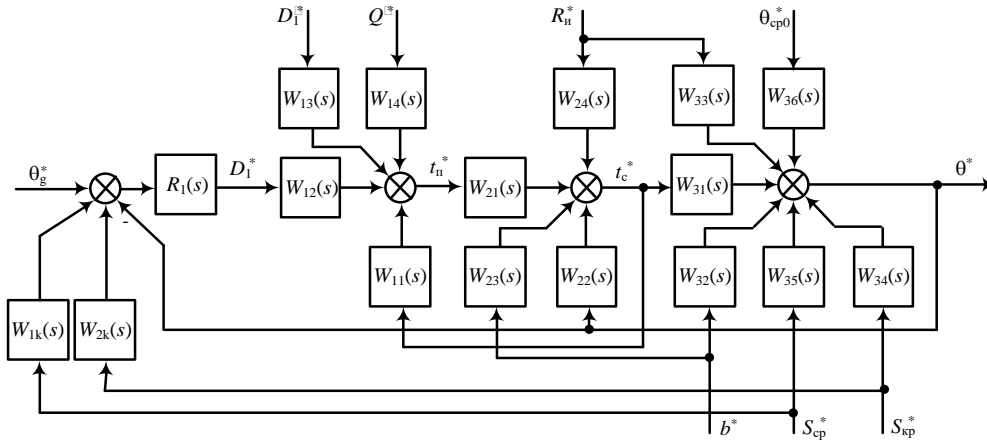


Рисунок 2. – Структурная схема комбинированной системы автоматического управления температурой в вакуум-выпарной установке с корректирующими контурами по расходам слабого и концентрированного растворов

Для математического описания динамики изменения концентрации веществ в упариваемом растворе используем допущения: плотность слабого раствора при изменениях концентрации температуры не изменяется, концентрация считается сосредоточенным параметром, равным концентрации на выходе из выпарного аппарата. Тогда уравнение материального баланса примет вид

$$(G'_0 + h\rho\eta) \frac{db}{dt} + b\rho\eta \frac{dh}{dt} = b_{cp}S_{cp} - bS_{kp}, \tag{18}$$

где G'_0 – масса слабого раствора в объеме, начиная от плоскости отсчета уровня;
 b_{cp} – начальная концентрация веществ в слабом растворе.

С учетом того, что $r \gg r_n$, а также выражений (12), (18) динамика изменения концентрации может быть описана уравнением

$$f_1 \frac{db}{dt} = b_{cp}S_{cp} - b(S_{kp} - W), \tag{19}$$

где $f_1 = G'_0 + h\rho\eta$.

Линеаризуем (19) и заменим абсолютные значения переменных их приращениями безразмерной формы. С учетом нулевых начальных условий получим модель динамики по концентрации в виде

$$b^* = W_{51}(s)S_{cp}^* + W_{52}(s)b_{cp}^* + W_{53}(s)h^* + W_{54}(s)S_{kp}^* + W_{55}(s)W^*, \tag{20}$$

где $W_{5i}(s) = k_{5i} / T_5 s + 1$ – передаточные функции по каналам, влияющим на концентрацию ($i = 1:5$);
 k_{5i} – коэффициенты передачи;
 T_5 – постоянная времени;
 $b_{cp}^* = L(\Delta b_{cp} / b_{cp0})$.

Для определения коэффициентов передачи и постоянных времени используются следующие формулы:

$$k_{51} = -l_{42}S_{cp0} / l_{41}b_0, \quad k_{52} = -l_{43}b_{cp0} / l_{41}b_0, \quad k_{53} = -l_{44}h_0 / l_{41}b_0,$$

$$k_{54} = -l_{45}S_{kp0}/l_{41}b_0, \quad k_{55} = -l_{46}W_0/l_{41}b_0, \quad T_5 = -1/l_{41},$$

$$l_{41} = \frac{\partial}{\partial b} \left(\frac{b_{cp}S_{cp} - bS_{kp} + bW}{f_1} \right) \Big|_0, \quad l_{42} = \frac{\partial}{\partial S_{cp}} \left(\frac{b_{cp}S_{cp}}{f_1} \right) \Big|_0, \quad l_{43} = \frac{\partial}{\partial b_{cp}} \left(\frac{b_{cp}S_{cp}}{f_1} \right) \Big|_0,$$

$$l_{44} = \frac{\partial}{\partial h} \left(\frac{b_{cp}S_{cp} - bS_{kp} + bW}{f_1} \right) \Big|_0, \quad l_{45} = \frac{\partial}{\partial S_{kp}} \left(\frac{bW - bS_{kp}}{f_1} \right) \Big|_0, \quad l_{46} = \frac{\partial}{\partial W} \left(\frac{bW - bS_{kp}}{f_1} \right) \Big|_0.$$

Анализ (14), (20) позволяет выделить в качестве управляющего воздействия на величину концентрации сухих веществ в слабом растворе b величину расхода концентрированного раствора S_{kp} , отводимого из аппарата, и использовать для реализации замкнутой системы управления с отрицательной обратной связью ПИД-регулятор с передаточной функцией $R_2(s)$ (рисунок 3). При этом возмущающие воздействия, вызванные колебаниями расходов слабого S_{cp} и расхода вторичного пара W , могут быть полностью скомпенсированы введением соответствующих динамических компенсаторов с передаточными функциями $W_{3k}(s)$ и $W_{4k}(s)$.

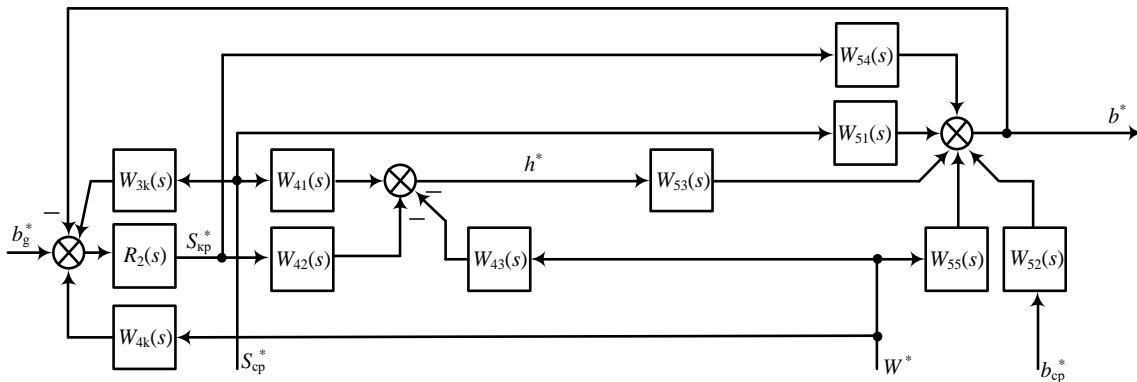


Рисунок 3. – Структурная схема комбинированной системы автоматического управления концентрацией сухих веществ в вакуум-выпарной установке с корректирующими контурами по расходу слабого раствора и расходу вторичного пара

Управляющее воздействие в такой комбинированной автоматической системе будет определяться следующим образом:

$$S_{kp}^* = R_2(s)(b_g^* + W_{3k}(s)S_{cp}^* + W_{2k}(s)W^* - b^*), \quad (21)$$

где b_g^* – величина задающего воздействия по концентрации.

Передаточные функции динамических компенсаторов определим, применив к (14), (20) условие полной инвариантности системы автоматического управления к возмущениям S_{cp}^* , W^* :

$$W_{3k}(s) = -(W_{41}(s)W_{53}(s) + W_{51}(s))/R_2(s)(W_{42}(s)W_{53}(s) + W_{54}(s)), \quad (22)$$

$$W_{4k}(s) = (W_{43}(s)W_{53}(s) - W_{55}(s))/R_2(s)(W_{54}(s) - W_{42}(s)W_{53}(s)). \quad (23)$$

Для математического описания динамики изменения вакуумметрического давления рассмотрим конденсатор смешения (поз. 7 на рисунке 1), как совокупность следующих элементов: жидкость в струях и на полках, паровоздушное пространство, металл полок и корпуса [5; 6]. При построении модели использованы допущения: пар в конденсаторе является сухим насыщенным, температура и давление представляют собой сосредоточенные параметры, температуры неконденсирующихся газов и пара равны, по составу неконденсирующиеся газы близки к воздуху, параметры металла и жидкости не зависят от давления и температуры, давление в выпарной установке представляет собой сумму парциальных давлений воздуха и пара $q = q_n + q_b$, в конденсатор подается вторичный пар с расходом W .

Состояние конденсатора смешения определяется следующими переменными: t_k'' – температура вторичного пара, $t_{ж}$ – температура воды для охлаждения на входе конденсатора, $t_{ж1}$ – температура воды

после конденсатора, $D_{\text{ж}}$ – расход воды, подаваемой в конденсатор, $D_{\text{ж}1}$ – расход воды после конденсатора, $D_{\text{в}}$ – расход воздуха, поступающего в конденсатор, $D_{\text{в}1}$ – расход воздуха после конденсатора, $G_{\text{в}}$ – масса воздуха, находящегося в конденсаторе, $G_{\text{ж}}$ – масса воды, находящейся в конденсаторе, $\varepsilon = G_{\text{в}}/G_{\text{ж}}$, $Q_{\text{п}}$ – тепловые потери. Учитывая принятые допущения, для описания динамики давления q , применим уравнение [6]

$$g_1 p q = g_2 t_{\text{к}}'' + g_3 t_{\text{ж}1} + g_4 t_{\text{ж}} + g_5 + g_6, \quad (24)$$

где g_i ($i = 1:6$) – функции, зависящие от переменных $t_{\text{к}}''$, $D_{\text{ж}}$, $D_{\text{ж}1}$, $D_{\text{в}}$, $D_{\text{в}1}$, W , ε , $Q_{\text{п}}$, описывающих состояние конденсатора смешения, а также конструктивных параметров и свойств теплоносителей.

Формулы для вычисления функций g_i приведены в [6]. Линеаризуем уравнение (24) и заменим абсолютные значения переменных их приращениями безразмерной формы. Разделим отклонения переменных на соответствующие их величины в состоянии равновесия и выполним преобразование Лапласа: $t_{\text{к}}''^* = L(\Delta t_{\text{к}}''/t_{\text{к}0}'')$, $D_{\text{ж}}^* = L(\Delta D_{\text{ж}}/D_{\text{ж}0})$, $D_{\text{ж}1}^* = L(\Delta D_{\text{ж}1}/D_{\text{ж}10})$, $D_{\text{в}}^* = L(\Delta D_{\text{в}}/D_{\text{в}0})$, $D_{\text{в}1}^* = L(\Delta D_{\text{в}1}/D_{\text{в}10})$, $\varepsilon^* = L(\Delta \varepsilon/\varepsilon_0)$, $Q_{\text{п}}^* = L(\Delta Q_{\text{п}}/Q_{\text{п}0})$. С учетом нулевых начальных условий динамика вакуумметрического давления описывается уравнением

$$q^* = W_{61}(s)t_{\text{к}}''^* + W_{62}(s)D_{\text{ж}}^* + W_{63}(s)D_{\text{ж}1}^* + W_{64}(s)D_{\text{в}}^* + W_{65}(s)D_{\text{в}1}^* + W_{66}(s)\varepsilon^* + W_{67}(s)W^* + W_{68}(s)Q_{\text{п}}^*, \quad (25)$$

где $W_{6i}(s) = k_{6i}/s$ ($i = 1:8$) – передаточные функции каналов парожидкостного пространства; k_{6i} – коэффициенты передачи, определяемые по формулам

$$k_{61} = l_{51} t_{\text{к}0}''/q_0, \quad k_{62} = l_{52} D_{\text{ж}0}/q_0, \quad k_{63} = l_{53} D_{\text{ж}10}/q_0, \quad k_{64} = l_{54} D_{\text{в}0}/q_0, \quad k_{65} = l_{55} D_{\text{в}10}/q_0,$$

$$k_{66} = l_{56} \varepsilon_0/q_0, \quad k_{67} = l_{57} W_0/q_0, \quad k_{68} = l_{58} Q_{\text{п}0}/q_0,$$

$$l_{51} = \frac{\partial}{\partial t_{\text{к}}''} \left(\frac{g_2 t_{\text{к}}'' + g_3 t_{\text{ж}1} + g_4 t_{\text{ж}} + g_5 + g_6}{g_1} \right) \Big|_0, \quad l_{52} = \frac{\partial}{\partial D_{\text{ж}}} \left(\frac{g_2 t_{\text{к}}'' + g_3 t_{\text{ж}1} + g_4 t_{\text{ж}} + g_5 + g_6}{g_1} \right) \Big|_0,$$

$$l_{53} = \frac{\partial}{\partial D_{\text{ж}1}} \left(\frac{g_2 t_{\text{к}}'' + g_3 t_{\text{ж}1} + g_5 + g_6}{g_1} \right) \Big|_0, \quad l_{54} = \frac{\partial}{\partial D_{\text{в}}} \left(\frac{g_2 t_{\text{к}}'' + g_5 + g_6}{g_1} \right) \Big|_0, \quad l_{55} = \frac{\partial}{\partial D_{\text{в}1}} \left(\frac{g_2 t_{\text{к}}'' + g_5 + g_6}{g_1} \right) \Big|_0,$$

$$l_{56} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left(\frac{g_2 t_{\text{к}}'' + g_3 t_{\text{ж}1} + g_4 t_{\text{ж}} + g_5 + g_6}{g_1} \right) \Big|_0, \quad l_{57} = \frac{\partial}{\partial W} \left(\frac{g_3 t_{\text{ж}1} + g_6}{g_1} \right) \Big|_0, \quad l_{58} = \frac{\partial}{\partial Q_{\text{п}}} \left(\frac{g_6}{g_1} \right) \Big|_0.$$

Подстановка начальных условий $t_{\text{к}0}''$, $D_{\text{ж}0}$, $D_{\text{ж}10}$, $D_{\text{в}0}$, $D_{\text{в}10}$, W_0 , ε_0 , $Q_{\text{п}0}$ в вышеприведенные формулы после выполнения дифференцирования обозначена символом $|_0$.

Анализ (25) позволяет выделить в качестве управляющего воздействия на величину вакуумметрического давления в выпарной установке q величину расхода воды, подаваемой в конденсатор $D_{\text{ж}}$, и использовать для реализации замкнутой системы управления с отрицательной обратной связью ПИД-регулятор с передаточной функцией $R_3(s)$ (рисунок 4). При этом возмущающие воздействия, вызванные колебаниями температуры вторичного пара $t_{\text{к}}''$ и расхода воздуха после конденсатора $D_{\text{в}1}$, могут быть полностью скомпенсированы введением соответствующих динамических компенсаторов с передаточными функциями $W_{5k}(s)$ и $W_{6k}(s)$.

Управляющее воздействие в такой комбинированной автоматической системе будет определяться следующим образом:

$$D_{\text{ж}}^* = R_3(s) \left(q_g^* + W_{5k}(s)t_{\text{к}}''^* + W_{2k}(s)D_{\text{в}1}^* - q^* \right), \quad (26)$$

где q_g^* – величина задающего воздействия по давлению.

Передаточные функции динамических компенсаторов определим, применив к (25), (26) условие полной инвариантности системы автоматического управления к возмущениям t_k^* , $D_{в1}^*$:

$$W_{5k}(s) = -W_{61}(s)/R_3(s)W_{62}(s), \tag{27}$$

$$W_{6k}(s) = -W_{65}(s)/R_3(s)W_{62}(s). \tag{28}$$

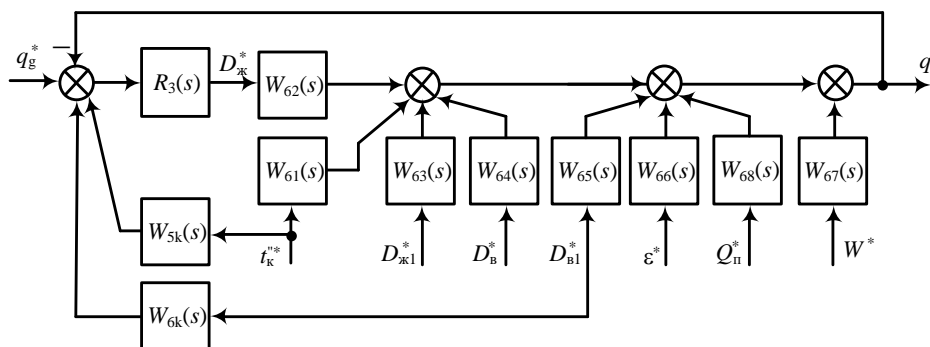


Рисунок 4. – Структурная схема комбинированной системы автоматического управления давлением в вакуум-выпарной установке с корректирующими контурами по температуре вторичного пара и расходу воздуха после конденсатора

Заключение. Предложен новый метод синтеза комбинированных автоматических систем управления температурой, концентрацией и глубиной вакуума для вакуум-выпарных установок. Метод основан на линеаризованных моделях динамики и позволяет синтезировать динамические компенсаторы возмущающих воздействий, вызванных колебаниями расхода и температуры слабого раствора на входе в выпарной аппарат, а также изменения вакуумметрического давления. Применение предложенных структур систем автоматического управления позволит повысить эффективность использования теплоносителей в вакуум-выпарных установках в химической и пищевой промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айрапетьянц, Г.М. Совершенствование систем автоматического регулирования технологическими процессами / Г.М. Айрапетьянц, А.В. Акулич, Н.И. Ульянов. – Могилев : МГУП, 2012. – 322 с.
2. Айрапетьянц, Г.М. Выбор каналов управления вакуум-выпарными установками / Г.М. Айрапетьянц, М.М. Кожевников, Е.Л. Волынская // Вестник МГУП. – 2010. – № 1(8). – С. 95–103.
3. Брусиловский, Л.П. АСУТП цельномолочных и молочных производств / Л.П. Брусиловский, А.Я. Вайнберг. – М. : Колос, 1993. – 363 с.
4. Брусиловский, Л.П. Научно-технические решения для создания автоматизированных биотехнологических комплексов цельномолочного производства / Л.П. Брусиловский, В.Д. Харитонов. – М. : ГНУВНИМИ, 1999. – 57 с.
5. Айрапетьянц, Г.М. Динамические модели вакуум-выпарных установок для молочной промышленности / Г.М. Айрапетьянц, М.М. Кожевников // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2009. – № 6. – С. 53–63.
6. Таубман, Е.И. Выпаривание / Е.И. Таубман. – М. : Химия, 1982. – 328 с.

Поступила 20.01.2021

SYNTESIS OF COMBINED CONTROL AUTOMATIC SYSTEMS FOR VACUUM EVAPORATORS

M. KOZHEVNIKOV, S. ADAMOV

The paper proposes a method for the synthesis of combined automatic control systems for temperature, concentration and vacuum depth for vacuum evaporation plants based on linearized dynamics models. The performed analysis shows the channels for applying the disturbing effects and the transfer functions of the dynamic compensators for the control loops of temperature, concentration and vacuum were found. The proposed method allows find the transfer functions of dynamic compensators in various operating modes of a vacuum evaporator.

Keywords: dynamic model, combined control, vacuum evaporator.