

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №1 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-1>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN116.pdf>

DOI: 10.15862/01TVN116 (<http://dx.doi.org/10.15862/01TVN116>)

Статья опубликована 24.02.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Жежера Н.И., Тюков Н.И. Вертикальная печь для обжига известняка как объект управления по разрежению печных газов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №1 (2016)
<http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN116.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI:
10.15862/01TVN116

УДК 681.5:62-5 (691-431)

Жежера Николай Илларионович

ФГБОУ «Оренбургский государственный университет», Россия, Оренбург¹
Профессор кафедры «Систем автоматизации производства»
Доктор технических наук
E-mail: nik-gegera@mail.ru

Тюков Николай Иванович

ФГБОУ «Оренбургский государственный университет», Россия, Оренбург
Магистрант
E-mail: nikolai.tyukov@yandex.ru

Вертикальная печь для обжига известняка как объект управления по разрежению печных газов

Аннотация. В статье приведены теоретические положения применительно к вертикальной печи для обжига известняка как объекту управления по разрежению печных газов. Определено дифференциальное уравнение, которое устанавливает взаимозависимость между разрежением печных газов в верхней части вертикальной печи для обжига известняка и давлением, и расходом воздуха, поступающего в вертикальную печь для обжига известняка, давлением и расходом печных газов, выходящих из вертикальной печи через регулирующий клапан. Проведена линеаризация дифференциального уравнения и установлены аналитические выражения для его коэффициентов преобразования и постоянной времени объекта управления.

Дифференциальное уравнение преобразовано к операторному виду и выделены элементарные динамические звенья. Используя выделенные элементарные динамические звенья, составлена динамическая схема вертикальной печи для обжига известняка как объекта управления по разрежению печных газов.

Аналитические выражения для коэффициентов дифференциального уравнения позволяют провести теоретические исследования влияния конструктивных и технологических параметров вертикальной печи и характеристик регулирующего клапана, установленного на выходе печных газов из вертикальной печи, на динамические характеристики печи.

Дифференциальное уравнение и аналитические выражения для коэффициентов уравнения служат основой для проектирования и эффективной эксплуатации цифровых

¹ 460053, г. Оренбург, ул. Дружбы, 5, кв. 11

систем управления вертикальной печью для обжига известняка как объектом управления по разрежению печных газов.

Ключевые слова: вертикальная печь; обжиг известняка; печные газы; разрежение; давление; расход; дифференциальное уравнение; элементарные динамические звенья; объект управления; линеаризация; динамическая схема

На рисунке 1 изображена принципиальная схема вертикальной печи для обжига известняка [1], используемая на сахарных заводах для получения извести и углекислого газа. Вертикальная печь для обжига известняка состоит из шахты 1 цилиндрической формы с загрузочным устройством 2 и выгрузочным устройством 3.

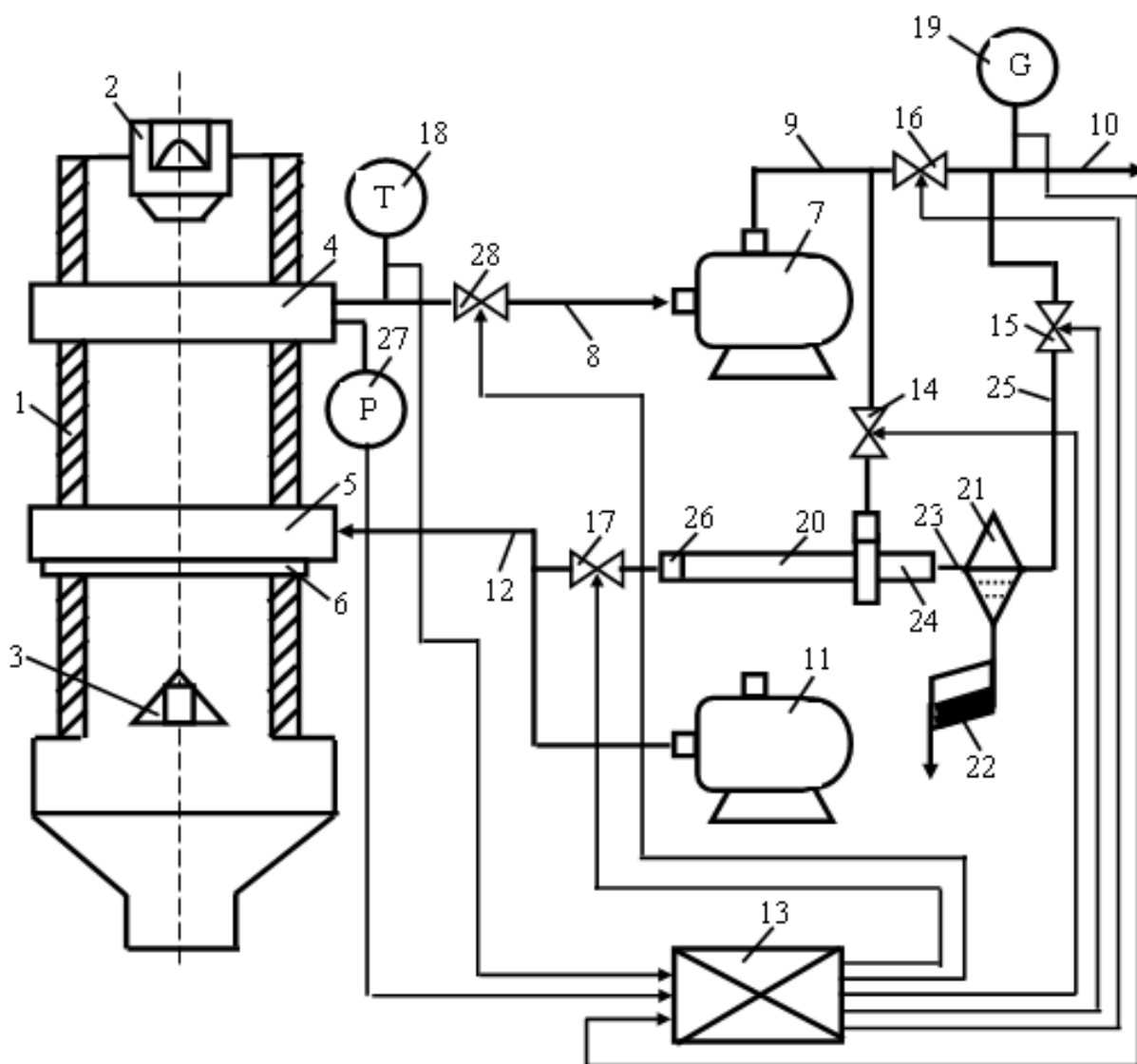


Рис. 1. Принципиальная схема вертикальной печи для обжига известняка (разработана авторами)

В горизонтальных сечениях шахты 1 печи размещены газоход 4 отвода печных газов и воздухопровод 5 для подачи воздуха в печь, который установлен на фланце 6. Через входной патрубок и трубопровод 8 газовый насос 7 соединен с газоходом отвода печных газов 4. Нагнетательный патрубок насоса 7 трубопроводом 9 подключен к коллектору печных газов

10. Выход вентилятора 11 трубопроводом 12 соединен с воздухопроводом 5, а всасывающий патрубок - с калорифером (не показано).

К блоку управления 13 подключены управляемые клапаны 14 - 17, регулирующий клапан 28, а также датчики температуры 18, расхода 19 и разрежения 27. Через клапан 14 вихревая труба 20 подключена к трубопроводу 9, ее «холодный» конец 24 соединен через клапан 15 с коллектором печных газов 10, а «горячий» конец 26 через клапан 17 – с трубопроводом 12. Датчик 27 разрежения расположен на газоходе 4 отвода печных газов, регулирующий клапан 28 расположен на трубопроводе 8, соединенным с одной стороны с газоходом отвода печных газов 4, а с другой - с всасывающим патрубком 8 газового насоса 7 отвода печных газов.

Вертикальная печь для обжига известняка работает по следующему технологическому процессу. Определенное по технологическим регламентам количество известняка и твердого топлива (каменного угля) через загрузочное устройство 2 подают с помощью скипового подъемника (не показан) в шахту 1 печи. Воздух, подогретый в калорифере, поступает на горение в вертикальную печь от вентилятора 11 через воздухопровод 5. Из газохода 4 через регулирующий клапан 28 и трубопровод 8 печные газы с температурой, воспринимаемой датчиком 18, отводятся газовым насосом 7 через клапан 16 к коллектору печных газов 10.

Датчик 27 разрежения, подключенный к газоходу 4 отвода печных газов, измеряет в газоходе 4 и верхней части печи разрежение и передает информацию в блок управления 13. По сигналам от блока управления 13 регулирующий клапан 28, установленный на трубопроводе 8, изменяет разрежение в газоходе 4 отвода печных газов и в верхней части вертикальной печи 1 для обжига известняка.

Основы теоретического анализа устройств и производственных процессов, рассматривая их как объекты систем управления, рассмотрены на примерах изготовления сорбента из углеродного остатка после пиролиза изношенных шин [2] и разделения на компоненты (воду, природный газ и нефть) водонепфтегазовой смеси [3; 4; 5].

На рисунке 2 представлена схема модели вертикальной печи для обжига известняка как объекта управления по разрежению печных газов. Она содержит пневматическое сопротивление 3, эквивалентное сопротивлениям 4, расположенное на входе воздуха в вертикальную печь, емкости 5 (зон подготовки и обжига известняка в вертикальной печи) и регулирующего клапана 6 (клапан 28 на рисунке 1), расположенного на выходе печных газов из вертикальной печи. Сопротивления 4 моделируют форсунки, пропускающие воздух в печь через воздухопровод 5 (рисунок 1).

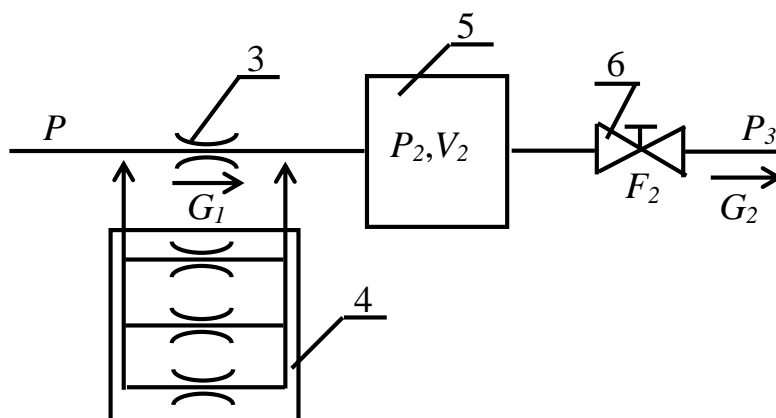


Рис. 2. Схема модели вертикальной печи для обжига известняка как объекта управления по разрежению печных газов (разработана авторами)

Для пневматического сопротивления, емкости и регулирующего клапана, соединенных последовательно (рисунок 2), динамический процесс представим выражением

$$V_2 \frac{d\rho}{dt} = G_1 - G_2, \quad (1)$$

Где V_2 - объем печных газов в емкости 5, м³; G_1 и G_2 - массовый расход печных газов в емкость 5 и из этой емкости, кг/с; t - время, с.

Из гидромеханики для газообразных сред известно [6] уравнение $P/\rho = RT$. После дифференцирования этого выражения по плотности среды и давлению, оно принимает вид $dP_2 = RTd\rho$ или

$$dP_2 / dt = RTd\rho / dt. \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в уравнение (1), получим

$$\frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} = G_1 - G_2. \quad (3)$$

Принимаем докритической скоростью печных газов из вертикальной печи через клапан 6 (рисунок 2). Для докритического движения газов через регулирующий клапан массовый расход G_2 определяется по выражению [7]

$$G_2 = \mu_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}}, \quad (4)$$

где μ_2 - коэффициент расхода печных газов для клапана; F_2 - эффективная площадь клапана, через который проходят печные газы, м²; K_a - коэффициент, вычисляемый по формуле из работы [6] по коэффициенту адиабаты; P_2 - давление печных газов в емкости 5, Па; P_3 - давление печных газов после регулирующего клапана 6, Па.

Расход печных газов через сопротивление 4 определим по формуле для расхода газов через щели [8]

$$Q_\phi = \phi \frac{\pi d_\phi^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho_2} (P - P_2)},$$

где Q_ϕ - расход печных газов через сопротивление 4 (рисунок 2), м³/с; d_ϕ - внутренний диаметр сопротивления, м; P и P_2 - давление печных газов до и после сопротивления 4, Па; ρ_2 - плотность печных газов, кг/м³; ϕ - коэффициент расхода печных газов для пневматического сопротивления.

Учитывая, что массовый расход воздуха G_ϕ , кг/с, и объемный расход Q_ϕ , м³/с, взаимосвязаны выражением $G_\phi = Q_\phi \cdot \rho_2$, тогда

$$G_\phi = \phi \frac{\pi d_\phi^2}{4} \sqrt{2\rho_2 \cdot (P - P_2)}.$$

Так как воздух проходит через n параллельно соединенных дросселей 4 (форсунок), тогда массовый расход воздуха в вертикальную печь G_1 , м³/с

$$G_1 = n \cdot \varphi \frac{\pi d_\phi^2}{4} \sqrt{2\rho_z \cdot (P - P_2)}$$

или $G_1 = \varphi \cdot F_2 \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P - P_2)}$, (5)

где $F_2 = n \cdot \pi d_\phi^2 / 4$ - площадь проточных сечений параллельно расположенных дросселей (форсунок), через которые проходит воздух в вертикальную печь.

Подставив соотношения (4) и (5) в уравнение (3), получим

$$\frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} = \varphi \cdot F_1 \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P - P_2)} - \mu_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}}. \quad (6)$$

Так как уравнение (6) нелинейное, его обычно линеаризуют. Принимаем переменными величинами в уравнении (6) P , P_2 , P_3 , F_1 и F_2 , для которых установившиеся значения принимают вид:

$$P \rightarrow P_0; P_2 \rightarrow P_{20}; P_3 \rightarrow P_{30}; F_1 \rightarrow F_{10}; F_2 \rightarrow F_{20}. \quad (7)$$

Если переменные величины выразить через постоянные начальные значения и приращения, тогда:

$$P = P_0 + \Delta P; P_2 = P_{20} + \Delta P_2; P_3 = P_{30} + \Delta P_3; F_1 = F_{10} + \Delta F_1; F_2 = F_{20} + \Delta F_2. \quad (8)$$

Разложим в ряд Тейлора правую часть выражение (6) по переменным первого порядка P , P_2 , P_3 , F и F_2 , считая его функцией $M(P, P_2, P_3, F_1, F_2 \dots)$.

$$M(F_1, F_2, P, P_2, P_3) = M(F_{10}, F_{20}, P_0, P_{20}, P_{30}) + \left(\frac{\partial M}{\partial F_1} \right)_0 \Delta F_1 +$$

$$+ \left(\frac{\partial M}{\partial F_2} \right)_0 \Delta F_2 + \left(\frac{\partial M}{\partial P} \right)_0 \Delta P + \left(\frac{\partial M}{\partial P_2} \right)_0 \Delta P_2 + \left(\frac{\partial M}{\partial P_3} \right)_0 \Delta P_3. \quad (9)$$

Согласно соотношению (9) формула (6) принимает вид

$$\frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} = \left(\varphi \cdot F_1 \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P - P_2)} \right)_0 + \left(\frac{\partial \left[\varphi \cdot F_1 \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P - P_2)} \right]}{\partial F_1} \right)_0 \Delta F_1 +$$

$$+ \left(\frac{\partial \left[\varphi \cdot F_1 \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P - P_2)} \right]}{\partial P} \right)_0 \Delta P + \left(\frac{\partial \left[\varphi \cdot F_1 \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P - P_2)} \right]}{\partial P_2} \right)_0 \Delta P_2 -$$

$$- \left(\mu_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}} \right)_0 - \left(\frac{\partial \left[\mu_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}} \right]}{\partial F_2} \right)_0 \Delta F_2 -$$

$$-\left(\frac{\partial\left[\mu_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2(P_2-P_3)}{RT}}\right]}{\partial P_2}\right) \Delta P_2 - \left(\frac{\partial\left[\mu_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2(P_2-P_3)}{RT}}\right]}{\partial P_3}\right) \Delta P_3. \quad (10)$$

В выражении (10) сначала определяются производные, а потом выполняется подстановка установившихся значений из соотношений (7) вместо переменных параметров.

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} = & \varphi \cdot F_{10} \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P_0 - P_{20})} + \varphi \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta F_1 + \\ & + \varphi \cdot F_{10} \cdot \frac{\rho_z}{\sqrt{2\rho_z \cdot (P_0 - P_{20})}} \Delta P + \varphi \cdot F_{10} \cdot \frac{-\rho_z}{\sqrt{2\rho_z \cdot (P_0 - P_{20})}} \Delta P_2 - \\ & - \mu_2 F_{20} K_a \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20}-P_{30})}{RT}} - \mu_2 K_a \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20}-P_{30})}{RT}} \Delta F_2 - \\ & - \mu_2 F_{20} K_a \frac{(2P_{20}-P_{30})}{2RT \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20}-P_{30})}{RT}}} \Delta P_2 + \mu_2 F_{20} K_a \frac{P_{20}}{2RT \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20}-P_{30})}{RT}}} \Delta P_3. \end{aligned} \quad (11)$$

Рассматривая установившееся движение печных газов из вертикальной печи, выражение (6) при значениях соотношений (7) принимает вид

$$\frac{V_2}{RT} \frac{dP_{20}}{dt} = \varphi \cdot F_{10} \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P_0 - P_{20})} - \mu_2 F_{20} K_a \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20}-P_{30})}{RT}} = 0. \quad (12)$$

Производная от установившегося значения dP_{20}/dt равна нулю, а поэтому и выражение (12) равно нулю. Это уравнение характеризует установившийся расход печных газов через составляющие элементы схемы, которая приведена на рисунке 2, а именно

$$G_0 = \varphi \cdot F_{10} \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P_0 - P_{20})} = \mu_2 F_{20} K_a \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20}-P_{30})}{RT}}. \quad (13)$$

Если из уравнения (11) вычесть уравнение (12), а затем разделить обе части выражения на установившееся значение расхода G_0 , тогда получим

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{G_0 RT} \frac{dP_2}{dt} = & \frac{\Delta F_1}{F_{10}} + \frac{1}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta P - \frac{1}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta P_2 - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} - \\ & - \frac{(2P_{20}-P_{30})}{2P_{20}(P_{20}-P_{30})} \Delta P_2 + \frac{P_{20}}{2P_{20}(P_{20}-P_{30})} \Delta P_3. \end{aligned} \quad (14)$$

После упрощения выражение (14) принимает вид

$$\frac{V_2}{G_0 RT} \frac{dP_2}{dt} = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} + \frac{1}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta P - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} -$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2} \left[\frac{P_{20}(P_0 - P_{20}) + P_{30}P_0}{(P_0 - P_{20})P_{20}(P_{20} - P_{30})} \right] \Delta P_2 + \frac{P_{20}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_3 \\
 \text{или} & \frac{V_2}{G_0RT} \frac{dP_2}{dt} + \frac{P_{20}(P_0 - P_{20}) + P_{30}P_0}{2(P_0 - P_{20})P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_2 = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} + \\
 & + \frac{1}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta P + \frac{P_{20}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_3. \tag{15}
 \end{aligned}$$

Запишем уравнение (15) так, чтобы в нём были отношения $\Delta P/P_0$; $\Delta P_2/P_{20}$ и $\Delta P_3/P_{30}$.

$$\begin{aligned}
 & \frac{V_2 \cdot P_{20}}{G_0RT} \frac{d\left(\frac{\Delta P_2}{P_{20}}\right)}{dt} + \frac{P_{20}(P_0 - P_{20}) + P_{30}P_0}{2(P_0 - P_{20})(P_{20} - P_{30})} \frac{\Delta P_2}{P_{20}} = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} + \\
 & + \frac{P_0}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \frac{\Delta P}{P_0} + \frac{P_{20}P_{30}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \frac{\Delta P_3}{P_{30}}. \tag{16}
 \end{aligned}$$

Вводим обозначения: $\frac{V_2 P_{20}}{G_0RT} = T_b$; $\frac{\Delta P}{P_0} = x(t)$; $\frac{\Delta F_1}{F_{10}} = b(t)$; $\frac{\Delta P_2}{P_{20}} = y(t)$;

$$\begin{aligned}
 & \frac{\Delta F_2}{F_{20}} = m(t); \quad \frac{\Delta P_3}{P_{30}} = n(t); \quad \frac{P_{20}(P_0 - P_{20}) + P_{30}P_0}{2(P_0 - P_{20})(P_{20} - P_{30})} = \kappa_1; \\
 & \frac{P_0}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} = \kappa_2; \quad \frac{P_{20}P_{30}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} = \kappa_3. \tag{17}
 \end{aligned}$$

Аналитические выражения (17) для коэффициентов дифференциального уравнения (16) служат основой для проектирования и эффективной эксплуатации цифровых систем управления [9; 10] вертикальной печи для обжига известняка как объекта управления по разрежению печных газов.

Уравнение (16) после подстановки соотношений (17) принимает вид

$$T_b \frac{dy}{dt} + k_4 y(t) = b(t) - m(t) + k_5 x(t) + k_6 n(t). \tag{18}$$

Если дифференциальное уравнение (18) преобразовать по Лапласу, тогда

$$(T_b s + k_1) y(s) = b(s) - m(s) + k_2 x(s) + k_3 n(s), \tag{19}$$

где s-оператор Лапласа.

Динамическая схема модели вертикальной печи как объекта управления по разрежению печных газов, состоящая из эквивалентного пневматического сопротивления, расположенного на входе воздуха в вертикальную печь, и регулирующего клапана, расположенного на выходе печных газов из вертикальной печи, построена по выражению (19) и приведена на рисунке 3.

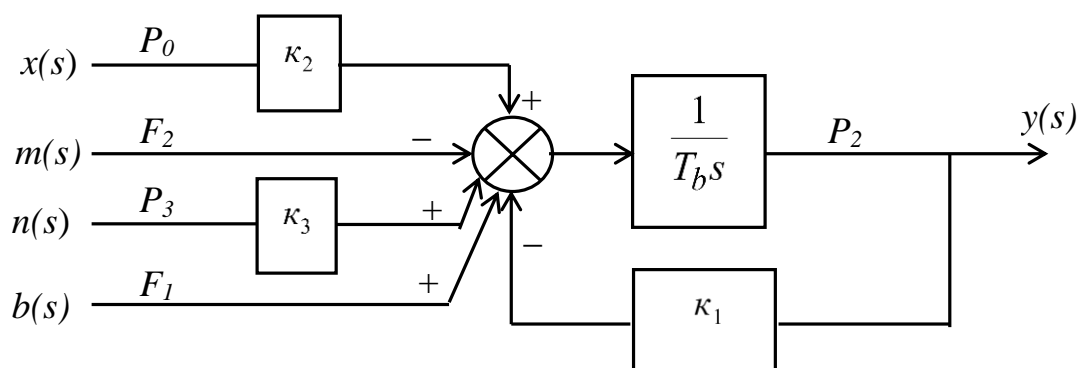


Рис. 3. *Динамическая схема модели вертикальной печи как объекта управления по разрежению печных газов (разработана авторами)*

По каждому входному параметру относительно выходной величины объекта управления по динамической схеме (рисунок 3) определяется передаточная функция. Например, для разрежения P_2 в вертикальной печи относительно эффективной площади проточного сечения регулирующего клапана, который изменяет отвод печных газов из вертикальной печи в атмосферу, передаточная функция имеет вид $W_{p2/F1}(s) = y(s)/m(s) = 1/(T_b s + k_1)$.

Таким образом, разработано математическое описание вертикальной печи для обжига известняка как объекта управления по разрежению печных газов. Составленное дифференциальное уравнение отражает взаимосвязь между разрежением печных газов в вертикальной печи для обжига известняка и массовым расходом и давлением воздуха, поступающего в вертикальную печь на горение, расходом и давлением печных газов, выходящих через регулирующий клапан из вертикальной печи. Дифференциальное уравнение преобразовано к операторному виду и определены элементарные динамические звенья. На основе выделенных элементарных динамических звеньев составлена динамическая схема вертикальной печи для обжига известняка как объекта управления по разрежению печных газов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов, С.Г. Шахтная печь для обжига сыпучего материала: пат. № 2431096 Российская Федерация / С.Г. Емельянов, Н.С. Кобелев, Т.В. Алябьева, О.А. Овчаренко, А.Ю. Журавлёв, А.С. Дюмин. - 2011. Бюл. №11. - 2 с.
2. Жежера, Н.И. Реактор производства сорбента из углеродного остатка пиролиза изношенных шин как объект автоматического управления по давлению и температуре газов / Н.И. Жежера, Н.Г. Самойлов // Интернет-журнал «Науковедение», 2013 №1 (14) [Электронный ресурс] - М.: Науковедение, 2013. - Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/04tvn113.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. - Яз. рус., англ.
3. Протодяконов, И.О. Гидродинамика и массообмен в системах газ-жидкость / И.О. Протодяконов, И.Е. Люблинская. - Л.: Наука, 1990. - 349 с.
4. Жежера, Н.И. Установка разделения нефтегазовой смеси на компоненты как объект управления по уровню жидкости / Н.И. Жежера // Интернет-журнал «Науковедение», 2014 №2 (21) [Электронный ресурс] - М.: Науковедение, 2014. - Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/31TVN214.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. - Яз. рус., англ.
5. Жежера, Н.И. Установка разделения нефтегазовой смеси на компоненты как объект управления по давлению газа / Н.И. Жежера // Интернет-журнал «Науковедение», 2014 №2 (21) [Электронный ресурс]-М.: Науковедение, 2014. - Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/32TVN214.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. - Яз. рус., англ.
6. Емцев, Б.Т. Техническая гидромеханика: учебник для вузов: М-во высш. и средн. образования СССР. – Изд. 2-е перераб. и доп. / Б.Т. Емцев. – М.: Машиностроение, 1987. - 440 с.
7. Иващенко, Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем: учеб. пособие для вузов: М-во высш. и средн. специал. образования СССР. – Изд. 4-е перераб. и доп. / Н.Н. Иващенко. – М.: Машиностроение, 1978. - 736 с.
8. Нагорный, В.С. Устройства автоматики гидро- и пневмосистем / В.С. Нагорный. А.А. Денисов. – М.: Высшая школа, 1991.–367 с.
9. Куо, Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: Перевод с англ. В.Г. Дунаевой, Б.И. Копыловой, А.Н. Косиловой; под ред. д-ра техн. наук проф. П.И. Попова / Б. Куо. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.
10. Изерман, Р. Цифровые системы управления: Перевод с английского / Р. Изерман. - М.: Мир, 1984. - 541 с.

Zhezhera Nikolay Illarionovich

Orenburg State University, Russia, Orenburg
E-mail: nik-gegera@mail.ru

Tyukov Nikolay Ivanovich

Orenburg State University, Russia, Orenburg
E-mail: nikolai.tyukov@yandex.ru

Vertical kiln limestone as a control object by the negative pressure of furnace gases

Abstract. In the article theoretical provisions with respect to the vertical furnace for roasting of limestone as an object of management on dilution of flue gases. Defined differential equation, which establishes the interdependence between the negative pressure of flue gases in the upper part of the vertical furnace for roasting of limestone and the pressure and flow of air flowing in a vertical furnace for burning limestone, pressure and flow rate of flue gases exiting the vertical furnace via a regulating valve. Held linearization of a differential equation and an analytical expression for its transform coefficients and time constant of the control object.

The differential equation is converted to the operator form dynamic and dedicated elementary links. Using selected basic dynamic links, dynamic circuit is composed of a vertical kiln for calcining limestone as an object of management on dilution of flue gases.

Analytical expressions for the coefficients of the differential equations allow to carry out theoretical research of influence of constructive and technological parameters of the vertical furnace and characteristics control valve installed on outlet of flue gases from the vertical kiln, on the dynamic characteristics of the furnace.

Differential equation and analytical expressions for the coefficients of the equation are the basis for the design and effective operation of digital control systems, vertical furnace for roasting of limestone as an object of management on dilution of flue gases.

Keywords: vertical kiln; calcination of the limestone; kiln gases; vacuum; pressure; flow rate; differential equations; elementary dynamic units; the object of control; linearization; dynamic schema.

REFERENCES

1. Emel'yanov, S.G. Shakhtnaya pech' dlya obzhiga sypuchego materiala: pat. № 2431096 Rossiyskaya Federatsiya / S.G. Emel'yanov, N.S. Kobelev, T.V. Alyab'eva, O.A. Ovcharenko, A.Yu. Zhuravlev, A.S. Dyumin. - 2011. Byul. №11. - 2 s.
2. Zhezhera, N.I. Reaktor proizvodstva sorbenta iz uglerodnogo ostatka piroliza iznoshennykh shin kak ob"ekt avtomaticheskogo upravleniya po davleniyu i temperature gazov / N.I. Zhezhera, N.G. Samoylov // Internet-zhurnal «Naukovedenie», 2013 №1 (14) [Elektronnyy resurs] - M.: Naukovedenie, 2013. - Rezhim dostupa: <http://naukovedenie.ru/PDF/04tvn113.pdf>, svobodnyy. – Zagl. s ekrana. - Yaz. rus., angl.
3. Protod'yakonov, I.O. Gidrodinamika i massoobmen v sistemakh gaz-zhidkost' / I.O. Protod'yakonov, I.E. Lyublinskaya. - L.: Nauka, 1990. - 349 s.
4. Zhezhera, N.I. Ustanovka razdeleniya neftevodogazovoy smesi na komponenty kak ob"ekt upravleniya po urovnyu zhidkosti / N.I. Zhezhera // Internet-zhurnal «Naukovedenie», 2014 №2 (21) [Elektronnyy resurs] - M.: Naukovedenie, 2014. - Rezhim dostupa: <http://naukovedenie.ru/PDF/31TVN214.pdf>, svobodnyy. – Zagl. s ekrana. - Yaz. rus., angl.
5. Zhezhera, N.I. Ustanovka razdeleniya neftevodogazovoy smesi na komponenty kak ob"ekt upravleniya po davleniyu gaza / N.I. Zhezhera // Internet-zhurnal «Naukovedenie», 2014 №2 (21) [Elektronnyy resurs]-M.: Naukovedenie, 2014. - Rezhim dostupa: <http://naukovedenie.ru/PDF/32TVN214.pdf>, svobodnyy. – Zagl. s ekrana. - Yaz. rus., angl.
6. Emtsev, B.T. Tekhnicheskaya gidromekhanika: uchebnyy dlya vuzov: M-vo vyssh. i sredn. obrazovaniya SSSR. – Izd. 2-e pererab. i dop. / B.T. Emtsev. – M.: Mashinostroenie, 1987. - 440 s.
7. Ivashchenko, N.N. Avtomaticheskoe regulirovanie. Teoriya i elementy sistem: ucheb. posobie dlya vuzov: M-vo vyssh. i sredn. spetsial. obrazovaniya SSSR. – Izd. 4-e pererab. i dop. / N.N. Ivashchenko. – M.: Mashinostroenie, 1978. - 736 s.
8. Nagornyy, V.S. Ustroystva avtomatiki gidro- i pnevmosistem / V.S. Nagornyy. A.A. Denisov. – M.: Vysshaya shkola, 1991.–367 s.
9. Kuo, B. Teoriya i proektirovanie tsifrovyykh sistem upravleniya: Perevod s angl. V.G. Dunaevoy, B.I. Kopylovoy, A.N. Kosilovoy; pod red. d-ra tekhn. nauk prof. P.I. Popova / B. Kuo. – M.: Mashinostroenie, 1986. – 448 s.
10. Izerman, R. Tsifrovyye sistemy upravleniya: Perevod s angliyskogo / R. Izerman. - M.: Mir, 1984. - 541 s.