

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО РАЗРЕЖЕНИЮ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ

Жежера Н. И., Сабанчин В. Р.

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

На рисунке 1 схематично изображена туннельная печь для обжига керамических стеновых изделий [1]. Туннельная печь содержит рабочий канал 1, условно разделенный на зоны сушки, подготовки, обжига и охлаждения, вентилятор отбора теплоносителя 2, установленный в конце зоны охлаждения, вентилятор 3 подачи атмосферного воздуха в зону охлаждения, отопительную систему 4, вентилятор, отбора дымовых газов 5, размещенный перед зоной сушки, вентилятор отбора горячего воздуха из зоны охлаждения 6, вентиляционную систему 7, включающую определенное количество блоков, последовательно распределенных по зоне сушки, вентилятор 11 для отсоса теплоносителя, установленный в начале зоны сушки. Блоки вентиляционной системы 7 состоят из нагнетающего вентилятора 8, к которому в определенном месте подведен трубопровод 9 для подачи воздуха из зоны охлаждения и трубопровод 10 для подсоса атмосферного воздуха.

Туннельная печь работает следующим образом. В рабочий канал 1 туннельной печи на некотором расстоянии от конца зоны охлаждения подают атмосферный воздух вентилятором 3. Вентилятором 2, установленным в конце зоны охлаждения, отбирают теплоноситель и направляют к вентилятору 3 подачи атмосферного воздуха.

За счет создаваемого перепада давлений воздух движется в противотоке с изделиями в сторону зоны обжига и в прямом потоке к выгрузочному концу, и таким образом создают давление в конце зоны охлаждения, равным давлению в цехе. Это позволяет создать в зоне охлаждения оптимальный аэродинамический режим и отказаться от металлических дверей на выгрузочном конце печи. Системой отопления 4 в зону обжига подают топливо, при сгорании которого нагреваются изделия до оптимальной температуры. Дымовые газы отбирают вентилятором 5, установленным перед зоной сушки, и выбрасывают в атмосферу.

Обычно перед вентилятором 5 отбора дымовых газов установлен регулирующий орган системы автоматического регулирования разрежения, которая поддерживает в зоне обжига туннельной печи значение разрежения в пределах 25-40 Па. Отопительная система 4 содержит форсунки, через которые поступает природный газ в зону горения. Для эффективного сжигания природного газа через каналы в форсунках в зону горения природного газа подается воздух из атмосферы.

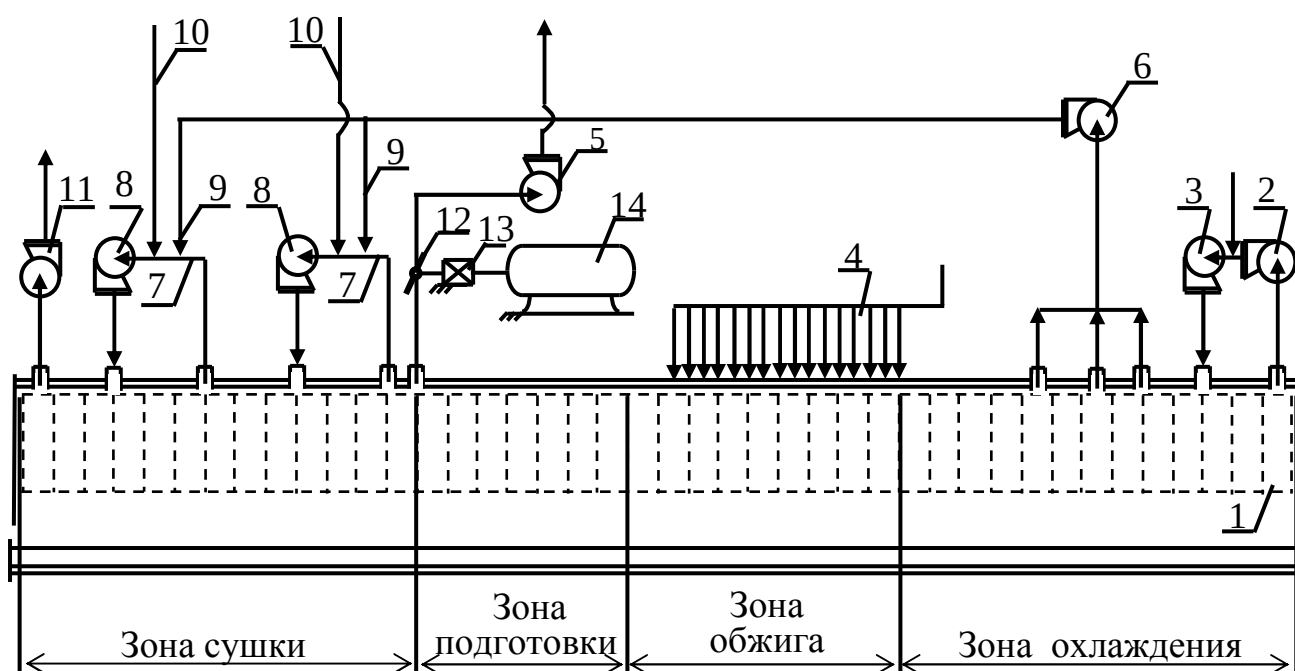


Рисунок 1 – Туннельная печь для обжига керамических стеновых изделий

В конце зоны сушки расположен первый блок вентиляционной системы 7. Вентилятором 8 отбирают теплоноситель, движущийся в прямотоке с изделиями, смешивают с атмосферным воздухом, поступающим через трубопровод 10, и с горячим воздухом, который по трубопроводу 9 отбирают вентилятором 6 из зоны охлаждения и нагнетают в зону сушки против хода изделий. Использование предложенной вентиляционной системы позволяет в зоне сушки создать циркуляцию теплоносителя в противотоке и прямотоке с движением изделий. Теплоноситель, движущийся от первого блока 7 в противотоке, поступает ко второму блоку 7, где вентилятором 8 отбирают теплоноситель из зоны сушки, смешивают через трубопровод 10 с атмосферным воздухом и трубопровод 9 с горячим воздухом из зоны охлаждения и нагнетают в рабочий канал так же против хода изделий. Число блоков 7 вентиляционной системы по длине зоны сушки и их габариты определяются сушильными свойствами, используемых глин и производительностью печи. После последнего блока вентиляционной системы теплоноситель отбирают вентилятором 11 и выбрасывают в атмосферу. В результате этого в рабочем канале 1 начала зоны сушки создают давление, равным давлению в цехе.

На рисунке 2 приведена схема модели туннельной печи по разрежению продуктов горения, которая состоит из пневматического сопротивления 3, эквивалентного сопротивлениям 4, расположенного на входе продуктов горения в туннельную печь, емкости 5 (зон подготовки и обжига в туннельной печи, отмеченных на рисунке 1) и регулирующего клапана 6,

расположенного на выходе продуктов горения из туннельной печи по разрежению. Пневматическими сопротивлениями 4 (рисунок 2) моделируются форсунки, через которые подается природный газ и воздух на горение в отопительную систему 4 (рисунок 1).

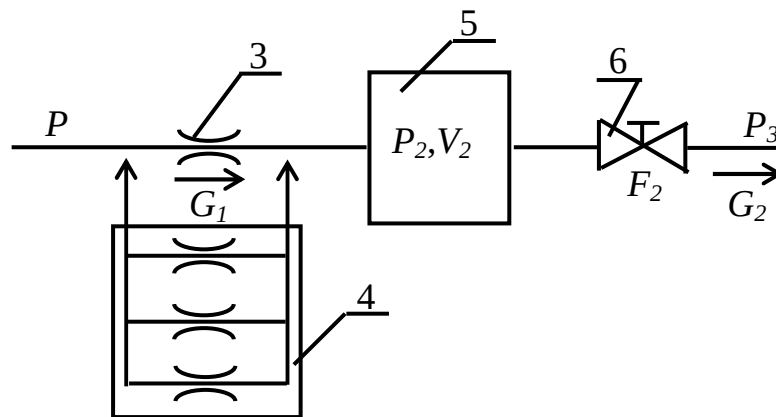


Рисунок 2 - Схема модели туннельной печи по разрежению продуктов горения

Динамику устройства, состоящего из емкости, пневматического сопротивления и регулирующего клапана (рисунок 2) представим в следующем виде

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

где V_2 - объем продуктов горения в емкости 5 (зонах подготовки и обжига туннельной печи, м^3 ; ρ - плотность продуктов горения в емкости 5, $\text{кг}/\text{м}^3$; t - время, с; G_1 и G_2 - массовый расход продуктов горения в емкость 5 и из этой емкости, $\text{кг}/\text{с}$.

Для газовых сред известно [2] уравнение $P/c = RT$. Если взять производные в этом уравнении по давлению и плотности среды, тогда $dP_2 = RTdc$ или $dP_2/dt = RTdc/dt$. Подставив это выражение в уравнение (1), получим

$$\frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} = G_1 - G_2. \quad (2)$$

Скорость движения продуктов горения из туннельной печи через клапан 6 (рисунок 2) принимаем докритической. При докритическом течении газа массовый расход через регулирующий клапан G_2 определяется по формуле [3]

$$G_2 = \mu_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2 (P_2 - P_3)}{RT}}, \quad (3)$$

где μ_2 - коэффициент, характеризующий расход продуктов горения через регулирующий клапан; F_2 - площадь сечения регулирующего клапана, через которое проходят продукты горения, м^2 ; K_a - коэффициент, определяемый по коэффициенту адиабаты продуктов горения [2]; P_2 , P_3 - давление продуктов горения в емкости 5 и после регулирующего клапана 6, Па.

Для определения расхода продуктов горения через одно из пневматических сопротивлений 4 (форсунку для прохождения природного газа и воздуха) используем формулу для определения расхода через щели [4], которая применительно к обозначениям на рисунке 2 принимает вид

$$Q_{\phi} = \eta \frac{p d_{\phi}^2}{4} \sqrt{\frac{2}{c_{\varepsilon}} (P - P_2)},$$

где Q_{ϕ} - объемный расход продуктов горения через одно пневматическое сопротивление 4, м³/с; d_{ϕ} - диаметр пневматического сопротивления, м; P и P_2 - давление продуктов горения, Па; ρ_{ε} - плотность продуктов горения, протекающих через пневматическое сопротивление, кг/м³; ϕ - коэффициент расхода продуктов горения через пневматическое сопротивление (принимается $\phi = 0,75$).

Массовый расход продуктов горения через одну форсунку G_{ϕ} , кг/с, определяется выражением $G_{\phi} = Q_{\phi} \cdot c_{\varepsilon}$, тогда

$$G_{\phi} = \eta \frac{p d_{\phi}^2}{4} \sqrt{2 c_{\varepsilon} \cdot (P - P_2)}.$$

Так как продукты горения проходят через несколько параллельных форсунок n (параллельно соединенных дросселей 4), тогда расход продуктов горения G_1 , м³/с

$$G_1 = n \cdot \eta \frac{p d_{\phi}^2}{4} \sqrt{2 c_{\varepsilon} \cdot (P - P_2)}$$

или

$$G_1 = \eta \cdot F_2 \cdot \sqrt{2 c_{\varepsilon} \cdot (P - P_2)}, \quad (4)$$

где $F_2 = n \cdot p d_{\phi}^2 / 4$ - площадь проходного сечения обобщенного пневматического сопротивления всех параллельно расположенных форсунок, через которые проходит природный газ и воздух.

Подставив соотношения (3) и (4) в уравнение (2), получим

$$\frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} = \eta \cdot F_1 \cdot \sqrt{2 c_{\varepsilon} \cdot (P - P_2)} - m_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2 (P_2 - P_3)}{RT}}. \quad (5)$$

Уравнение (5) является нелинейным и его необходимо линеаризовать. Принимая в качестве переменных величин в уравнении (5) F_1, F_2, P, P_2 и P_3 , установившиеся значения этих переменных величин принимают вид:

$$F_1 \rightarrow F_{10}; F_2 \rightarrow F_{20}; P_2 \rightarrow P_{20}; P \rightarrow P_0; P_3 \rightarrow P_{30}. \quad (6)$$

Переменные величины, выраженные через установившиеся значения и приращения, имеют вид:

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

Обозначим правую часть соотношения (5) как функцию $M(F_1, F_2, P, P_2, P_3 \dots)$ и разложим ее в ряд Тейлора, не учитывая при этом производные второго и выше порядков, по переменным F_1, F_2, P, P_2 и P_3 :

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

$$+\left(\frac{\partial M}{\partial F_2}\right)_0 DF_2 + \left(\frac{\partial M}{\partial P}\right)_0 DP + \left(\frac{\partial M}{\partial P_2}\right)_0 DP_2 + \left(\frac{\partial M}{\partial P_3}\right)_0 DP_3. \quad (8)$$

Выполним запись правой части формулы (5) согласно соотношению (8).

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} = & \left(\eta \cdot F_1 \cdot \sqrt{2c_z \cdot (P - P_2)} \right)_0 + \left(\frac{\partial \left[\eta \cdot F_1 \cdot \sqrt{2c_z \cdot (P - P_2)} \right]}{\partial F_1} \right)_0 DF_1 + \\ & + \left(\frac{\partial \left[\eta \cdot F_1 \cdot \sqrt{2c_z \cdot (P - P_2)} \right]}{\partial P} \right)_0 DP + \left(\frac{\partial \left[\eta \cdot F_1 \cdot \sqrt{2c_z \cdot (P - P_2)} \right]}{\partial P_2} \right)_0 DP_2 - \\ & - \left(m_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}} \right)_0 - \left(\frac{\partial \left[m_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}} \right]}{\partial F_2} \right)_0 DF_2 - \\ & - \left(\frac{\partial \left[m_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}} \right]}{\partial P_2} \right)_0 DP_2 - \left(\frac{\partial \left[m_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}} \right]}{\partial P_3} \right)_0 DP_3. \end{aligned} \quad (9)$$

В соотношении (9) вначале берутся производные, а потом вместо переменных параметров осуществляется подстановка их установившихся значений из выражений (6).

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} = & \eta \cdot F_{10} \cdot \sqrt{2c_z \cdot (P_0 - P_{20})} + \eta \cdot \sqrt{2c_z \cdot (P_0 - P_{20})} DF_1 + \\ & + \eta \cdot F_{10} \cdot \frac{c_z}{\sqrt{2c_z \cdot (P_0 - P_{20})}} DP + \eta \cdot F_{10} \cdot \frac{-c_z}{\sqrt{2c_z \cdot (P_0 - P_{20})}} DP_2 - \\ & - m_2 F_{20} K_a \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}} - m_2 K_a \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}} DF_2 - \\ & - m_2 F_{20} K_a \frac{(2P_{20} - P_{30})}{2RT \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}}} DP_2 + m_2 F_{20} K_a \frac{P_{20}}{2RT \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}}} DP_3. \end{aligned} \quad (10)$$

Рассматривая установившееся движение продуктов горения из туннельной печи уравнение (5) принимает вид при значениях соотношений (6)

$$\frac{V_2}{RT} \frac{dP_{20}}{dt} = \eta \cdot F_{10} \cdot \sqrt{2c_z \cdot (P_0 - P_{20})} - m_2 F_{20} K_a \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}} = 0. \quad (11)$$

Выражение (11) равно нулю, так как производная от постоянной величины dP_{20}/dt равна нулю. Уравнение (11) определяет установившийся расход продуктов горения через оба сужающих устройства, приведенного на рисунке 2, а именно

$$G_0 = \mu \cdot F_{10} \cdot \sqrt{2c_z \cdot (P_0 - P_{20})} = m_2 F_{20} K_a \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}}. \quad (12)$$

Из уравнения (10) вычитаем уравнение (11), делим обе части полученного выражения на установившийся расход G_0 и в результате получим

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{G_0 RT} \frac{dP_2}{dt} = & \frac{DF_1}{F_{10}} + \frac{1}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta P - \frac{1}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta P_2 - \frac{DF_2}{F_{20}} - \\ & - \frac{(2P_{20} - P_{30})}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_2 + \frac{P_{20}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_3. \end{aligned} \quad (13)$$

После упрощения (13) получим

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{G_0 RT} \frac{dP_2}{dt} = & \frac{DF_1}{F_{10}} + \frac{1}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta P - \frac{DF_2}{F_{20}} - \\ & - \frac{1}{2} \left[\frac{P_{20}(P_0 - P_{20}) + P_{30}P_0}{(P_0 - P_{20})P_{20}(P_{20} - P_{30})} \right] \Delta P_2 + \frac{P_{20}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_3 \\ \text{или} \quad \frac{V_2}{G_0 RT} \frac{dP_2}{dt} + & \frac{P_{20}(P_0 - P_{20}) + P_{30}P_0}{2(P_0 - P_{20})P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_2 = \frac{DF_1}{F_{10}} - \frac{DF_2}{F_{20}} + \\ & + \frac{1}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta P + \frac{P_{20}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_3. \end{aligned} \quad (14)$$

Уравнение (14) перепишем таким образом, чтобы в нём присутствовали отношения $\Delta P/P_0$; $\Delta P_2/P_{20}$ и $\Delta P_3/P_{30}$

$$\begin{aligned} \frac{V_2 \cdot P_{20}}{G_0 RT} \frac{d\left(\frac{\Delta P_2}{P_{20}}\right)}{dt} + & \frac{P_{20}(P_0 - P_{20}) + P_{30}P_0}{2(P_0 - P_{20})(P_{20} - P_{30})} \frac{\Delta P_2}{P_{20}} = \frac{DF_1}{F_{10}} - \frac{DF_2}{F_{20}} + \\ & + \frac{P_0}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \frac{\Delta P}{P_0} + \frac{P_{20}P_{30}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \frac{\Delta P_3}{P_{30}}. \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{Вводим обозначения: } \frac{V_2 P_{20}}{G_0 RT} = T_b; \quad \frac{\Delta P}{P_0} = x(t); \quad \frac{DF_1}{F_{10}} = b(t); \quad \frac{\Delta P_2}{P_{20}} = y(t);$$

$$\begin{aligned} \frac{DF_2}{F_{20}} = m(t); \quad \frac{\Delta P_3}{P_{30}} = n(t); \quad \frac{P_{20}(P_0 - P_{20}) + P_{30}P_0}{2(P_0 - P_{20})(P_{20} - P_{30})} = \kappa_1; \\ \frac{P_0}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} = \kappa_2; \quad \frac{P_{20}P_{30}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} = \kappa_3. \end{aligned} \quad (16)$$

Уравнение (15) с учетом соотношений (16) принимает вид

$$T_b \frac{dy}{dt} + k_4 y(t) = b(t) - m(t) + k_5 x(t) + k_6 n(t). \quad (17)$$

Если выражение (17) преобразовать по Лапласу, тогда

$$(T_b s + k_1) y(s) = b(s) - m(s) + k_2 x(s) + k_3 n(s), \quad (18)$$

где s -оператор Лапласа.

Структурная схема модели туннельной печи по разрежению продуктов горения, состоящая из обобщенного пневматического сопротивления, расположенного на входе продуктов горения в туннельную печь, емкости и

регулирующего клапана, расположенного на выходе продуктов горения из туннельной печи, построенная по выражению (18). представлена на рисунке 3.

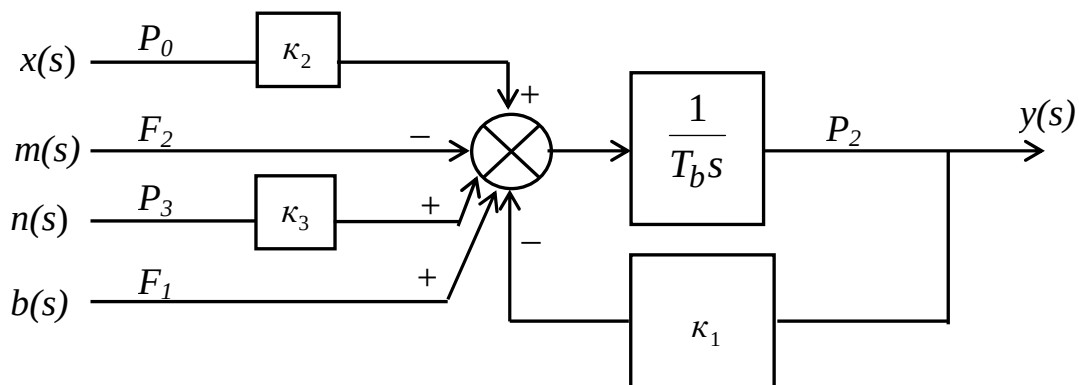


Рисунок 3 - Структурная схема модели туннельной печи по разрежению продуктов горения

По каждому входному параметру в соответствии со структурной схемой (рисунок 3) можно определить передаточную функцию. Например, передаточная функция изменения разрежения P_2 в туннельной печи по отношению к площади проходного сечения регулирующего клапана, изменяющего отвод продуктов горения из туннельной печи в атмосферу имеет вид $W_{p2/F1}(s) = y(s)/m(s) = 1/(T_b s + k_1)$.

Таким образом, разработано математическое описание туннельной печи для обжига керамических изделий как объекта автоматического управления по разрежению продуктов горения. Составлено дифференциальное уравнение, устанавливающее взаимосвязь между разрежением продуктов горения природного газа в туннельной печи для обжига керамических изделий и массовым расходом и давлением продуктов горения, поступающих в туннельную печь на горение, расходом и давлением продуктов горения топлива, выходящих через регулирующий орган из туннельной печи. Это дифференциальное уравнение нелинейное, поэтому проведена линеаризация его и установлены формульные выражения для его постоянных времени и коэффициентов.

Выполнено преобразование дифференциального уравнения к операторному виду и выделены типовые динамические звенья. На основе установленных типовых динамических звенья, составлена структурная схема туннельной печи для обжига керамических изделий как объекта автоматического управления по разрежению продуктов горения природного газа. Полученное дифференциальное уравнение и формулы для вычисления коэффициентов уравнения, позволяют разрабатывать и эксплуатировать цифровые системы автоматического управления туннельной печью для обжига керамических изделий как объектом автоматического управления по разрежению продуктов горения.

Список литературы

1. Патент РФ №2187771 С2, кл. F27B9/0. Туннельная печь-сушилка. Авторы изобретения: Лапин Ю.А., Дуденкова Г.Я., Гудков Ю.В., Шелыганова Р.Н. Приоритет от 07.08.2000. Оpubл. 20.08.2002. Бюл. №12.
2. Емцев, Б.Т. Техническая гидромеханика: учебник для вузов / Б.Т. Емцев; М-во высш. и средн. образования СССР. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987.- 440 с.
3. Иващенко, Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем: учеб. пособие для вузов / Н.Н. Иващенко; Мин-во высш. и средн. специал. образования СССР. – Изд. 4-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. -736 с.
4. Нагорный, В.С. Устройства автоматики гидро- и пневмосистем / В.С. Нагорный, А.А. Денисов. – М. : Высшая школа, 1991.–367 с.