

**Жежера Николай Илларионович**  
Zhezhera Nikolay Illarionovich  
ФГБОУ Оренбургский государственный университет  
FSEE Orenburg State University  
Профессор кафедры Систем автоматизации производства  
Professor of department of automation systems  
Доктор технических наук, профессор  
E-Mail: Nik-gegera@rambler.ru

**Самойлов Николай Геннадьевич**  
Samoylov Nikolay Gennadyevich  
ФГБОУ Оренбургский государственный университет  
FSEE Orenburg State University  
Аспирант. Graduate  
E-Mail: NickolaySamoylov@rambler.ru

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами  
и производствами (промышленность)

**Реактор производства сорбента из углеродного остатка пиролиза  
изношенных шин как объект автоматического управления по давлению и  
температуре газов**

Reactor production of sorbent from carbon residue after pyrolysis waste tires as an  
object of automatic control of pressure and temperature gases

**Аннотация:** Разработано дифференциальное уравнение применительно к реактору производства сорбента из углеродного остатка пиролиза изношенных шин как объекту автоматического управления по давлению и по температуре газов. Проведены линеаризация полученного дифференциального уравнения и преобразование его к операторному виду. Используя типовые динамические звенья теории автоматического управления, составлена структурная схема реактора как объекта автоматического управления по давлению и по температуре газов.

**The Abstract:** Developed a differential equation for reactor production of sorbent from carbon residue after pyrolysis waste tires as an object of automatic control of pressure and temperature gases. The resulting differential equation was linearized and converted to operator view. A block diagram of the reactor as an object of automatic control of pressure and temperature gases is made by using standard dynamic elements of automatic control theory

**Ключевые слова:** Реактор, сорбент, объект управления, дифференциальное уравнение, давление, температура, структурная схема.

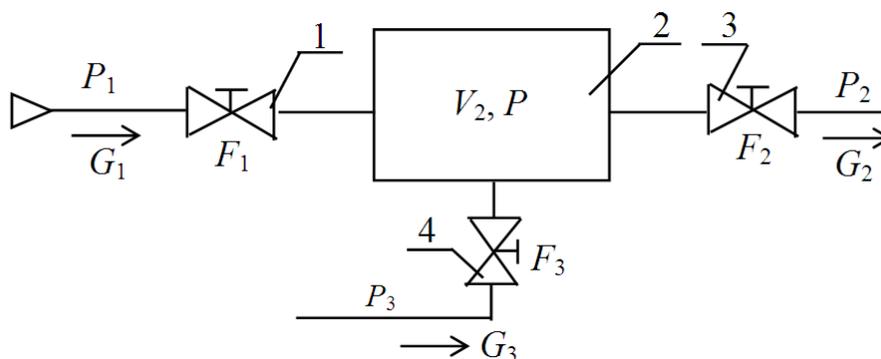
**Keywords:** Reactor, sorbent, object of automatic control, differential equation, pressure, temperature, block diagram.

\*\*\*

Интенсивно развивающимся в настоящее время способом утилизации изношенных автомобильных шин является пиролиз [8; 4, 3; 3, 53; 5, 33]. Основным продуктом пиролиза является углеродный остаток, из которого производится сорбент органических соединений (гидрофобный порошок) [9]. Этот сорбент в виду малой стоимости широко используется для

ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, для очистки сточных вод промышленных предприятий. Технологические процессы производства сорбента органических соединений недостаточно разработаны и фактически полностью не автоматизированы.

В реакторе производства сорбента органических соединений происходит обработка углеродного остатка, полученного после пиролиза изношенных шин, водяным паром, подаваемым в нижнюю часть реактора, и водой, которая распыляется в верхней части реактора. Паровоздушная смесь из реактора отводится в конденсатор, в котором пар превращается в конденсат, а неконденсируемые газы отводятся в атмосферу. На рисунке 1 приведена схема реактора 2, в котором происходит обработка углеродного остатка пиролиза изношенных шин водяным паром, подаваемым через клапан 1, и водой, подводимой через клапан 4, как объекта автоматического управления по давлению и температуре газов (паровоздушной смеси). Клапан 3 предназначен для отвода паровоздушной смеси из реактора в конденсатор.



**Рис. 1.** Схема реактора, в котором происходит обработка углеродного остатка пиролиза изношенных шин водяным паром и водой, как объекта автоматического управления по давлению и температуре газов

Течение водяного пара через клапан 1 (рисунок 1) реактора принимается сверхкритическим, а течение паровоздушной смеси через клапан 3 докритическим. Уравнение состояния газа [2] или водяного пара применительно к реактору 2 имеет вид

$$PV/RT = m, \quad (1)$$

где  $P$  – давление водяного пара в реакторе, Па;  $V$  – объем реактора, м<sup>3</sup>;  $R$  – газовая постоянная водяного пара, м<sup>2</sup>·с<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>;  $T$  – абсолютная температура водяного пара в реакторе, К;  $m$  – масса водяного пара в реакторе, кг.

В реакторе изменяются давление и температура водяного пара, то есть изменяются во времени в формуле (1) величины  $m$ ,  $P$  и  $T$ , а объем реактора  $V$  остается неизменным. Поэтому возьмем в уравнении (1) производную от трех переменных во времени

$$\frac{V}{RT} \frac{dP}{dt} - \frac{PV}{RT^2} \frac{dT}{dt} = \frac{dm}{dt}. \quad (2)$$

В этом выражении  $dm/dt$ , кг/с – изменение массового расхода водяного пара через реактор

$$dm/dt = G_1 - G_2 + G_3, \quad (3)$$

где  $G_1$ ,  $G_2$  – массовый расход водяного пара, поступающего в реактор, и пара, уходящего из него, кг/с;  $G_3$  – массовый расход воды, поступающей в реактор, кг/с.

Уравнение (2) с учетом (3) принимает вид

$$\frac{V}{RT} \frac{dP}{dt} - \frac{PV}{RT^2} \frac{dT}{dt} = G_1 - G_2 + G_3. \quad (4)$$

Для сверхкритического течения водяного пара через клапан 1 сечением  $F_1$  массовый расход определяется по формуле [6]

$$G_1 = \frac{\mu K_a F_1}{\sqrt{RT}} P_1, \quad (5)$$

где  $\mu_1$  – коэффициент расхода водяного пара через клапан 1;  $K_a$  – коэффициент, определяемый по формуле  $K_a = \sqrt{\frac{2K}{K+1} \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{2}{K-1}}}$  и по коэффициенту адиабаты водяного пара  $K = 1,3$ ;  $F_1$  – площадь проходного сечения клапана 1, м<sup>2</sup>;  $P_1$  – давление водяного пара до клапана 1, Па.

Для докритического массового расхода водяного пара через клапан 3 реактора используем уравнение [6]

$$G_2 = \mu_2 K_a F_2 \sqrt{\frac{P(P - P_2)}{RT}}, \quad (6)$$

где  $\mu_2$  – коэффициент расхода водяного пара через клапан 3 реактора;  $F_2$  – площадь проходного сечения клапана 3, м<sup>2</sup>;  $P$  и  $P_2$  – давления водяного пара в реакторе 2 и в выходном трубопроводе после клапана 3, Па.

Массовый расход воды, кг/с, поступающей в реактор, определим по [1]

$$G_3 = \mu_3 F_3 \sqrt{2\rho(P_3 - P)}, \quad (7)$$

где  $\mu_3$  – коэффициент расхода воды через клапан 4;  $F_3$  – площадь проходного сечения клапана 4 подвода воды в реактор, м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $P_3$  – давление воды до клапана 4 подвода ее в реактор, Па.

Уравнение (4) с учетом выражений (5), (6) и (7) принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{V}{RT} \frac{dP}{dt} - \frac{PV}{RT^2} \frac{dT}{dt} = & \frac{\mu_1 K_a F_1}{\sqrt{RT}} P_1 - \\ & - \mu_2 K_a F_2 \sqrt{\frac{P(P - P_2)}{RT}} + \mu_3 F_3 \sqrt{2\rho(P_3 - P)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнение (8) нелинейное и его необходимо линеаризовать. Переменными величинами в нем являются  $F_1, F_2, F_3, P_1, P, P_2, T$  и  $P_3$ . Установившиеся значения этих переменных величин обозначаем:

$$\begin{aligned} F_1 \rightarrow F_{10}; \quad F_2 \rightarrow F_{20}; \quad F_3 \rightarrow F_{30}; \quad P_1 \rightarrow P_{10}; \\ P \rightarrow P_0; \quad P_2 \rightarrow P_{20}; \quad T \rightarrow T_0; \quad P_3 \rightarrow P_{30}. \end{aligned} \quad (9)$$

Координаты переменных величин, выраженные через приращения и установившиеся значения, имеют вид:

$$\begin{aligned} F_1 &= F_{10} + \Delta F_1; & F_2 &= F_{20} + \Delta F_2; & F_3 &= F_{30} + \Delta F_3; & P_1 &= P_{10} + \Delta P_1; \\ P &= P_0 + \Delta P; & P_2 &= P_{20} + \Delta P_2; & T &= T_0 + \Delta T; & P_3 &= P_{30} + \Delta P_3. \end{aligned} \quad (10)$$

Для линеаризации уравнения (8) разложим его в ряд Тейлора по переменным  $F_1, F_2, F_3, P_1, P, P_2, T$  и  $P_3$  с учетом выражений (10)

$$\begin{aligned} \frac{V}{RT_0} \frac{dP}{dt} - \frac{P_0 V}{RT_0^2} \frac{dT}{dt} &= \frac{\mu_1 K_a F_{10} P_{10}}{\sqrt{RT_0}} + \frac{\mu_1 K_a P_{10}}{\sqrt{RT_0}} \Delta F_1 + \frac{\mu_1 K_a F_{10}}{\sqrt{RT_0}} \Delta P_1 - \\ &- \frac{1}{2} \frac{\mu_1 K_a F_{10} P_{10}}{T_0 \sqrt{RT_0}} \Delta T - \frac{\mu_2 K_a F_{20} \sqrt{P_0(P_0 - P_{20})}}{\sqrt{RT_0}} - \mu_2 K_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT_0}} \Delta F_2 - \\ &- \frac{1}{2} \frac{\mu_2 K_a F_{20} (2P_0 - P_{20})}{\sqrt{RT_0} \sqrt{P_0(P_0 - P_{20})}} \Delta P + \frac{\mu_2 K_a F_{20} P_0}{2 \sqrt{RT_0} \sqrt{P_0(P_0 - P_{20})}} \Delta P_2 + \\ &+ \frac{1}{2} \frac{\mu_2 K_a F_{20} \sqrt{P_0(P_0 - P_{20})}}{T_0 \sqrt{RT_0}} \Delta T + \mu_3 F_{30} \sqrt{2\rho(P_{30} - P_0)} + \\ &+ \mu_3 \sqrt{2\rho(P_{30} - P_0)} \Delta F_3 + \frac{1}{2} \mu_3 F_{30} \sqrt{\frac{2\rho}{(P_{30} - P_0)}} \Delta P_3 - \frac{1}{2} \mu_3 F_{30} \sqrt{\frac{2\rho}{(P_{30} - P_0)}} \Delta P. \end{aligned} \quad (11)$$

Для установившегося режима течения водяного пара через реактор, и установившегося поступления воды в него, уравнение (8) при значениях выражений (9) принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{V}{RT_0} \frac{dP}{dt} - \frac{P_0 V}{RT_0^2} \frac{dT}{dt} &= \frac{\mu_1 K_a F_{10} P_{10}}{\sqrt{RT_0}} - \\ &- \mu_2 K_a F_{20} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT_0}} + \mu_3 F_{30} \sqrt{2\rho(P_{30} - P_0)} = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Из уравнения (12) установившийся расход водяного пара и воды через реактор

$$G_0 = \frac{\mu_1 K_a F_{10} P_{10}}{\sqrt{RT_0}} + \mu_3 F_{30} \sqrt{2\rho(P_{30} - P_0)} = \mu_2 K_a F_{20} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT_0}}. \quad (13)$$

Количество воды, подаваемой в реактор, в общем случае, пропорционально расходу водяного пара через реактор, как в динамическом, так и в установившемся режимах. Если обозначить в уравнении (13)

$$G_{0п} = \frac{\mu_1 K_a F_{10} P_{10}}{\sqrt{RT_0}} \text{ и } G_{0в} = \mu_3 F_{30} \sqrt{2\rho(P_{30} - P_0)}, \quad (14)$$

где  $G_{0п}$  и  $G_{0в}$  – установившиеся массовые расходы, кг/с, водяного пара и охлаждающей воды, тогда из уравнений (13) и (14) получим

$$G_0 = G_{0п} + G_{0в}. \quad (15)$$

Принимаем, что между  $G_{0п}$  и  $G_{0в}$  имеется пропорциональность

$$G_{0в} = k_{вп} G_{0п}, \quad (16)$$

где  $k_{вп}$  – коэффициент соотношения массовых расходов воды и пара, поступающих в реактор.

Из соотношений (15) и (16) получим

$$G_0 = G_{0п}(1 + k_{вп}) \text{ и } G_0 = G_{0в}(1 + 1/k_{вп}). \quad (17)$$

С учетом выражений (14) формулы (17) принимают вид:

$$G_0 = (1 + k_{вп}) \frac{\mu_1 K_a F_{10} P_{10}}{\sqrt{RT_0}} \text{ и } G_0 = \left(1 + \frac{1}{k_{вп}}\right) \mu_3 F_{30} \sqrt{2\rho(P_{30} - P_0)}. \quad (18)$$

Если из уравнения (11) вычесть уравнение (13), затем разделить обе части полученного выражения на установившийся расход  $G_0$ , с учетом его значений по формулам (13) и (18), тогда получим

$$\begin{aligned} & \frac{VP_0}{G_0 RT_0} \frac{d(\Delta P/P_0)}{dt} + \frac{1}{2} \left[ \frac{(2P_0 - P_{20})}{(P_0 - P_{20})} + \frac{k_{вп} \cdot P_0}{(P_{30} - P_0)(k_{вп} + 1)} \right] \frac{\Delta P}{P_0} = \\ & = \frac{1}{(k_{вп} + 1)} \frac{\Delta F_1}{F_{10}} - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} + \frac{k_{вп}}{(k_{вп} + 1)} \frac{\Delta F_3}{F_{30}} + \frac{1}{k_{вп} + 1} \frac{\Delta P_1}{P_{10}} + \frac{P_{20}}{2(P_0 - P_{20})} \frac{\Delta P_2}{P_{20}} + \\ & + \frac{P_0 VT_0}{G_0 RT_0^2} \frac{d(\Delta T/T_0)}{dt} + \frac{1}{2} \frac{k_{вп}}{(k_{вп} + 1)} \frac{\Delta T}{T_0} + \frac{k_{вп} \cdot P_{30}}{2(P_{30} - P_0)(k_{вп} + 1)} \frac{\Delta P_3}{P_{30}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Введем обозначения:  $\frac{VP_0}{G_0 RT_0} = T_a$ ;  $\frac{\Delta P}{P_0} = x(t)$ ;  $\frac{\Delta F_1}{F_{10}} = a(t)$ ;

$$\frac{\Delta F_2}{F_{20}} = b(t); \quad \frac{\Delta P_1}{P_{10}} = c(t); \quad \frac{\Delta P_2}{P_{20}} = d(t); \quad \frac{\Delta P_3}{P_{30}} = m(t); \quad \frac{\Delta T}{T_0} = \alpha(t);$$

$$\frac{\Delta F_3}{F_{30}} = n(t); \quad \frac{1}{2} \left[ \frac{2P_0 - P_{20}}{P_0 - P_{20}} + \frac{k_{вп} \cdot P_0}{(P_{30} - P_0)(k_{вп} + 1)} \right] = k_1; \quad \frac{1}{k_{вп} + 1} = k_2;$$

$$\frac{P_{20}}{2(P_0 - P_{20})} = k_3; \quad \frac{k_{вп}}{k_{вп} + 1} = k_4; \quad \frac{P_{30}}{2(P_{30} - P_0)} = k_5. \quad (20)$$

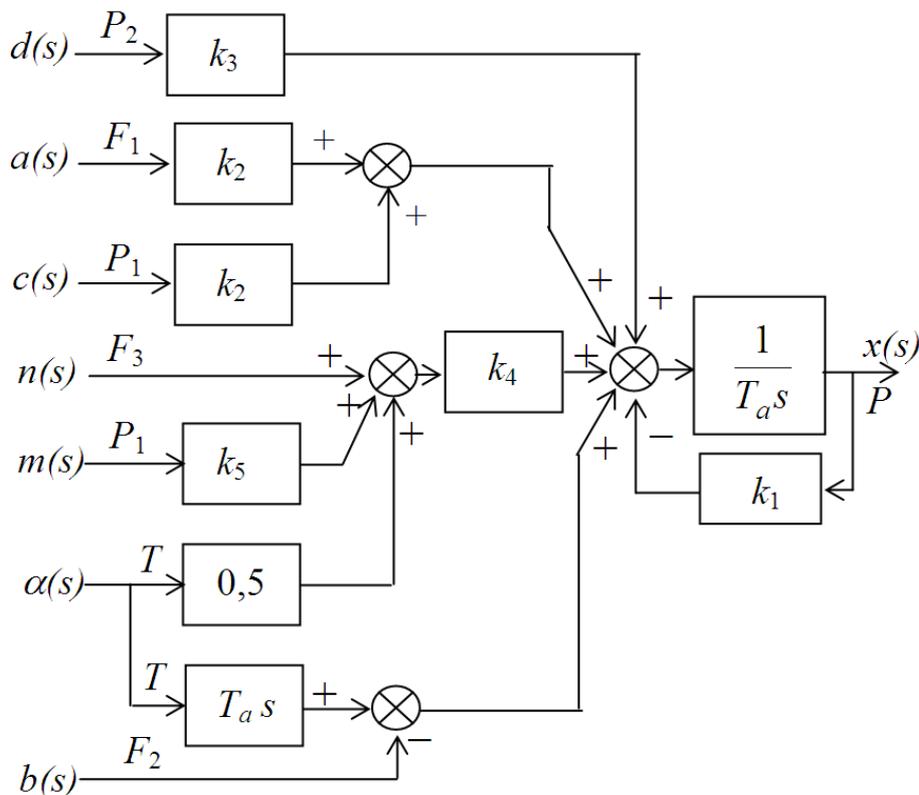
С учетом выражений (20) уравнение (19) принимает вид

$$\begin{aligned} & T_a [dx(t)/dt] + k_1 x(t) = k_2 a(t) - b(t) + k_2 c(t) + k_3 d(t) + \\ & + k_4 n(t) + k_4 k_5 m(t) + T_a [d\alpha(t)/dt] + 0,5k_4 \alpha(t). \end{aligned} \quad (21)$$

После преобразования уравнения (21) к операторному виду с использованием преобразования Лапласа, получим

$$\begin{aligned} & (T_a s + k_1) x(s) = k_2 a(s) - b(s) + k_2 c(s) + k_3 d(s) + \\ & + k_4 n(s) + k_4 k_5 m(s) + (T_a s + 0,5k_4) \alpha(s). \end{aligned} \quad (22)$$

На рисунке 2 представлена структурная схема реактора производства сорбента из углеродного остатка пиролиза изношенных шин с использованием водяного пара и воды как объекта автоматического управления по давлению и температуре газов в реакторе, составленная по выражению (22). При построении структурной схемы использованы передаточные функции типовых динамических звеньев теории автоматического управления.



**Рис. 2.** Структурная схема реактора производства сорбента из углеродного остатка пиролиза изношенных шин с использованием водяного пара и воды как объекта автоматического управления по давлению и температуре газов в реакторе

Коэффициенты  $k_1$ ,  $k_3$ ,  $k_5$  дифференциального уравнения (21), представлены в выражении (20) и определение их не вызывает затруднений. Для определения значений коэффициентов  $k_2$  и  $k_4$  составим уравнение теплового баланса для реактора производства сорбента органических соединений как объекта автоматического управления

$$G_1 \cdot i_1 + G_3 \cdot c_3 \cdot (t_3 - t_0) = G_3 \cdot c_3 \cdot (t_S - t_3) + G_3 \cdot r + G_3 \cdot (i_2 - i_{\text{нас.пара}}) + (G_1 + G_3) \cdot i_2, \quad (23)$$

где  $G_1$ ,  $G_3$  – расход пара и воды, поступающих в реактор производства сорбента, кг/с;  $i_1$  – теплосодержание пара, поступающего в реактор, Дж/кг;  $c_3$  – теплоемкость воды от  $t = 80$  °С до  $t_S = 179$  °С (по [7]  $c_3 = 1\,858,94$  Дж/кг·°С);  $t_3$  – температура воды, поступающей в реактор, °С;  $t_0$  – температура таяния льда, равная 0 °С;  $t_S$  – температура насыщения, то есть температура кипения воды, °С (вода подается в реактор, в котором давление составляет, например, 1,0 МПа; для давления 1,0 МПа по is-диаграмме для водяного пара определяем, что температура насыщения  $t_S = 180$  °С или более точно по [7]  $t_S = 179,04$  °С);  $r$  – теплота парообразования для воды, Дж/кг (при давлении пара в реакторе, равном 1,0 МПа,  $r = 2\,018,5$  КДж/кг [7]);  $i_2$  – энтальпия водяного пара в реакторе при температуре 250 °С и давлении 1,0 МПа (определяем по is-диаграмме, что  $i_2 = 2\,940$  КДж/кг);  $i_{\text{нас.пара}}$  – энтальпия насыщенного пара в реакторе произ-

водства сорбента при давлении 1,0 МПа и температуре насыщения  $t_s = 179,04$  °С (по is-диаграмме  $i_{\text{нас.пара}} = 2\,775$  КДж/кг или по [7]  $2\,777,1$  КДж/ кг).

Подставив численные значения в соотношение (23), получим

$$G_1 \cdot 3,55 \cdot 106 + G_3 \cdot 1858,94 \cdot (80-0) = G_3 \cdot 1858,94 \cdot (179-80) + G_3 \cdot 2,018 \cdot 106 + \\ + G_3 \cdot (2,94 \cdot 106 - 2,78 \cdot 106) + (G_1 + G_3) \cdot 2,94 \cdot 106 \text{ или } G_3 = 0,118 G_1.$$

Согласно соотношению (16)  $G_{\text{ов}} = k_{\text{вп}} G_{\text{оп}}$  и  $G_{\text{ов}} / G_{\text{оп}} \equiv G_3 / G_1 = k_{\text{вп}} = 0,118$  и по выражениям (20) получим:

$$k_2 = 1 / (k_{\text{вп}} + 1) = 0,894; k_4 = k_{\text{вп}} / (k_{\text{вп}} + 1) = 0,105.$$

Таким образом, разработано дифференциальное уравнение применительно к реактору производства сорбента из углеродного остатка пиролиза изношенных шин как объекту автоматического управления по давлению и по температуре газов. Проведены линеаризация полученного дифференциального уравнения и преобразование его к операторному виду. Используя типовые динамические звенья теории автоматического управления, составлена структурная схема реактора как объекта автоматического управления по давлению и по температуре газов.

Разработанные теоретические положения позволяют рационально проектировать цифровые системы автоматического управления по вычисляемым параметрам с использованием установленных коэффициентов полученного дифференциального уравнения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика: справочное пособие. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с.
2. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика: учебник для вузов. М-во высш. и средн. образования СССР. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987.- 440 с.
3. Жежера Н.И., Тямкин С.А. Автоматизация движения газов между порами в горизонтальном направлении при пиролизе изношенных шин в реакторе // Химическая промышленность сегодня. Москва. - 2010. – №8. – С. 53-56.
4. Жежера Н.И., Тямкин С.А. Интенсификация газообмена в крошке изношенных шин при пиролизе в реакторе // Автоматизация и современные технологии. Москва. – 2010. – №6. – С. 3-5.
5. Жежера Н.И., Тямкин С.А., Сайденова Г.А. Математическое описание реактора пиролиза изношенных шин как объекта автоматического управления по давлению газов // Автоматизация и современные технологии. Москва. – 2010. – №12. – С. 33-36.
6. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем: учеб. пособие для вузов. Мин-во высш. и средн. специал. образования СССР. – Изд. 4-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. -736 с.
7. Метрология, специальные общетехнические вопросы. Автоматизация. Приборы контроля и регулирования производственных процессов в нефтяной и нефтехимической промышленности. Серия справочников. Книга первая / под ред. Ю.И. Шендлера. – М.: ГНТИ нефтяной и горно-топливной литературы, 1962. – 785 с.
8. Патент RU № 2391205 РФ, МКИ<sup>2</sup> В 29 В 17/00. Способ термической переработки изношенных шин и резинотехнических изделий / Н.И. Жежера, С.А. Тямкин (РФ). - №2009100437/12. – Заявл. 11.01.2009. – Опубл. 10.06.2010. Бюл. №16. – 8 с.
9. Патент RU № 2396208 РФ, МКИ<sup>2</sup> С 01 В 31/08. Способ получения сорбента органических соединений / Н.И. Жежера, С.А. Тямкин, Д.А. Перепеляков (РФ). - №2009100438/15. – Заявл. 10.08.2010. – Опубл. 10.08.2010. Бюл. №22. – 6 с.

**Рецензент:** Султанов Наиль Закиевич, заведующий кафедрой систем автоматизации производства Аэрокосмического института ФГБОУ Оренбургский государственный университет, доктор технических наук.