

**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)

**Автоматизация производства сорбента из углеродного остатка пиролиза изношенных шин при периодических изменениях давления водяного пара в реакторе**

Automatization production sorbent from carbon residue after pyrolysis waste tires with periodic changes pressure of water steam in reactor

**Аннотация:** Выведены теоретические зависимости изменения давления в порах сорбента при его производстве в реакторе и расхода водяного пара от основных потоков пара, подводимого в нижнюю часть реактора, в поры при периодических изменениях давления водяного пара в нижней части реактора. Установлено, что при периодическом изменении давления водяного пара, подводимого в нижнюю часть реактора производства сорбента органических соединений из углеродного остатка пиролиза изношенных шин, давление в порах сорбента непрерывно изменяется, и непрерывно изменяются расходы водяного пара между порами и основными потоками пара. Это способствует более интенсивному и равномерному превращению углеродного остатка пиролиза изношенных шин в сорбент органических соединений в реакторе.

**The Abstract:** The theoretical relationships of change pressure in sorbent's pores in its production in the reactor and consumption of water steam from the main steam flow supplied to the bottom of reactor, with periodic changes pressure of water vapor in the bottom of reactor was derived. Found that the periodic change of pressure water vapor supplied to the bottom of reactor production sorbent of organic compounds from carbon residue, pressure in sorbent's pores is constantly changing and constantly changing consumptions of water vapor between the pores and the main steam flow. This contributes to a more intense and uniform conversion carbon residue after pyrolysis waste tires into sorbent of organic compounds.

**Ключевые слова:** Сорбент органических соединений, реактор, водяной пар, периодическое изменение давления, амплитуда, частота, пиролиз изношенных шин, углеродный остаток.

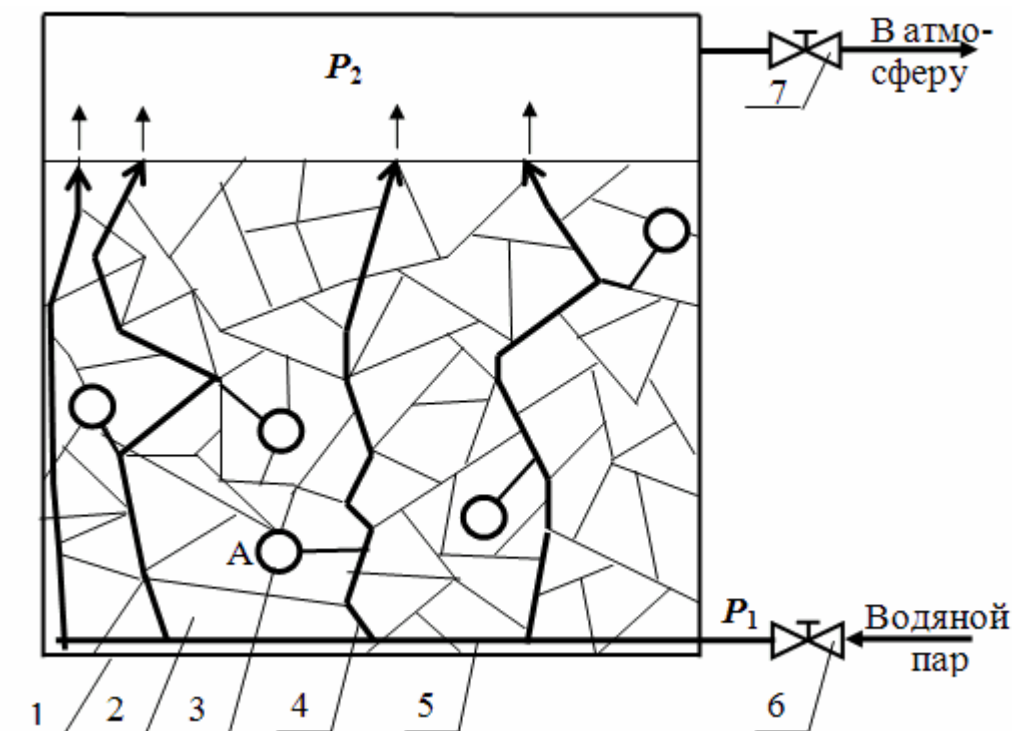
**Keywords:** Sorbent of organic compounds, reactor, water steam, periodic changes of pressure, amplitude, frequency, pyrolysis waste tires, carbon residue.

\*\*\*

В работах [2, 3] предлагается автоматизацию процессов термообработки углеродного остатка пиролиза изношенных шин при производстве сорбента органических соединений проводить путем подвода в реактор водяного пара под давлением, которое периодически изменяется с заданной частотой и амплитудой.

На рисунке 1 приведена схема реактора 1, в котором расположен углеродный остаток 2, получаемый в результате пиролиза изношенных шин на предшествующей технологической операции и загружаемый сверху в реактор. В углеродном остатке между механическими частицами имеются поры 3, которые соединяются через микрощели с потоками 4 водяного пара. Водяной пар подводится через клапан 6 и трубопровод 5 в нижнюю часть углеродного остатка, расположенного в реакторе. Через клапан 7 парогазовая смесь из верхней части реактора отводится в атмосферу (клапан для подвода воды сверху в реактор, заслонки, через которые загружается углеродный остаток в реактор и выгружается сорбент из реактора, на рисунке 1 не приведены).

Получение сорбента из углеродного остатка осуществляется по технологии, изложенной в работе [2], путем подачи в течение 10 минут водяного пара по трубопроводу 5 в нижнюю часть углеродного остатка, а потом подачи воды несколькими ступенями в верхнюю часть углеродного остатка для его окончательной активации и охлаждения.



**Рис. 1.** Схема расположения углеродного остатка пиролиза изношенных шин, пор между механическими частицами углеродного остатка и потоков водяного пара в реакторе производства сорбента органических соединений

Согласно ранее существующим технологическим процессам производства сорбента органических соединений из углеродного остатка пиролиза изношенных шин в реакторе водяной пар по трубопроводу 5 подавался в течение заданного промежутка времени при

постоянном давлении  $P_1$ . В соответствии с положениями работ [2, 3] подача водяного пара по трубопроводу 5 должна осуществляться при периодическом изменении давления в реакторе с амплитудой, равной 10-30 % от номинального значения, и с периодом, равным 0,5-3,0 минуты.

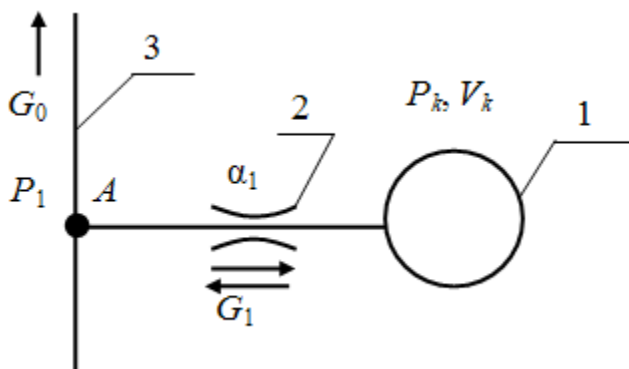
В статье приводится теоретическое обоснование целесообразности формирования переменной составляющей в давлении водяного пара, подводимого в нижнюю часть реактора производства сорбента органических соединений. Обосновывается, что в результате непрерывного изменения давления водяного пара в нижней части реактора происходит непрерывное изменение давления в порах и расходов парогазовой смеси между поровыми объемами и основными потоками водяного пара. Это способствует более интенсивному и равномерному превращению углеродного остатка в сорбент органических соединений в реакторе.

Газовую пору А (рисунок 1) при давлении  $P_k$  и объемом  $V_k$  между механическими частицами углеродного остатка в реакторе, соединенную с потоком водяного пара 4 внутри реактора, представим в виде схемы, приведенной на рисунке 2. Эта схема состоит из пневматического сопротивления 2, через которое протекает водяной пар в выделенную пору (газовую полость) 1 от потока водяного пара 3 в реакторе.

Водяной пар подается в нижнюю часть реактора 1 (рисунок 1) специальной системой автоматического управления под переменным давлением  $P_1$ , Па, которое определяется по выражению

$$P_1 = P_0 + P_x \cdot \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $P_0$  - статическая составляющая давления водяного пара, Па;  $P_x \cdot \sin \omega t$  - переменная составляющая давления водяного пара, Па;  $P_x$ ,  $\omega$  - амплитуда и частота переменной составляющей давления водяного пара, Па, с<sup>-1</sup>;  $t$  - время, с.



**Рис. 2.** Пневматическая схема прохождения водяного пара между потоком водяного пара и газовой полостью через пневматическое сопротивление

Углеродный остаток после пиролиза определенного объема изношенных шин подается в реактор производства сорбента органических соединений при средней температуре 500-600 °С. При такой температуре насыщенный пар, подаваемый в углеродный остаток, превращается в перегретый пар, смешивается с газами углеродного остатка и по гидродинамическим свойствам [3] его можно рассматривать как обычную смесь газов (газы) без конденсации газовых паров.

В верхней части реактора 1 (рисунок 1) поддерживается давление  $P_2$  с помощью регулятора, управляющего клапаном 7.

Расход газов  $G_1$  через пневматическое сопротивление 2 (рисунок 2) проводимостью  $\alpha_1$  на основании формулы расхода среды через линейные дроссели [1], с учетом выражения (1), имеет вид

$$G_1 = (P_1 - P_k) \cdot \alpha_1 = (P_0 + P_x \sin \omega t - P_k) \cdot \alpha_1.$$

После преобразования этого выражения по Лапласу, считая  $P_x$  и  $P_k$  переменными величинами от времени, получим

$$G_1(s) = \alpha_1 \cdot P_x(s) \cdot \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} - P_k(s) \cdot \alpha_1, \quad (2)$$

где  $s$  – оператор Лапласа.

Для газовой полости 1 (рисунок 2) как для пневматической емкости уравнение Клапейрона-Менделеева имеет вид [1]

$$P_k V_k = m_k R T,$$

где  $m_k$  - масса газов в полости 1, кг;  $R$  - газовая постоянная,  $\text{м}^2 \text{с}^{-2} \text{К}^{-1}$ ;  $T$  - абсолютная температура газов, К.

Дифференцируя по времени выше приведенное выражение по переменным величинам  $P_k$  и  $m_k$  применительно к пневматической схеме (рисунок 2), получим

$$\frac{dm_k}{dt} = \frac{V_k}{RT} \cdot \frac{dP_k}{dt}. \quad (3)$$

Изменение массы газов по времени в полости 1 равно расходу газов через пневматическое сопротивление 2 проводимостью  $\alpha_1$ , то есть  $dm_k / dt = G_1$ .

С учетом этого соотношения выражение (3) принимает вид  $G_1 = \frac{V_k}{RT} \cdot \frac{dP_k}{dt}$  или после преобразования по Лапласу

$$G_1(s) = \frac{V_k}{RT} \cdot s \cdot P_k(s). \quad (4)$$

Определяем из выражения (4) давление  $P_k$  в газовой полости 1 (рисунок 2)

$$P_k(s) = \frac{RT}{s V_k} \cdot G_1(s). \quad (5)$$

Из выражения (2) с учетом (5) получим

$$G_1(s) = \alpha_1 \cdot P_x(s) \cdot \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} - \frac{RT}{s V_k} \cdot G_1(s) \cdot \alpha_1$$

или

$$G_1(s) = \alpha_1 \cdot P_x(s) \cdot \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \cdot \frac{s}{s + \left( \frac{RT \alpha_1}{V_{k1}} \right)}. \quad (6)$$

$$\text{Принимаем, что } \frac{V_{k1}}{\alpha_1 \cdot RT} = T_1 \text{ или } \frac{1}{T_1} = \frac{RT}{V_{k1}} \cdot \alpha_1, \quad (7)$$

$$\text{тогда } G_1(s) = \alpha_1 \cdot P_x(s) \cdot \omega \cdot s \cdot \left[ \frac{1}{s^2 + \omega^2} \cdot \frac{1}{s + \frac{1}{T_1}} \right]. \quad (8)$$

Чтобы провести обратное преобразование по Лапласу выражения (8), необходимо его привести к табличным слагаемым.

$$\begin{aligned} G_1(s) &= \alpha_1 \cdot P_x(s) \cdot \omega \cdot s \cdot \left[ \frac{1}{s^2 + \omega^2} \cdot \frac{\left(s - \frac{1}{T_1}\right)}{\left(s - \frac{1}{T_1}\right)\left(s + \frac{1}{T_1}\right)} \right] = \\ &= \frac{1}{\left(-\frac{1}{T_1^2} - \omega^2\right)} \alpha_1 \cdot P_x(s) \cdot \omega \cdot \left[ \frac{s^2}{s^2 + \omega^2} - \frac{1}{T_1} \cdot \frac{s}{s^2 + \omega^2} - \frac{s}{\left(s + \frac{1}{T_1}\right)} \right] = \\ &= \frac{1}{\left(-\frac{1}{T_1^2} - \omega^2\right)} \alpha_1 \cdot P_x(s) \cdot \omega \cdot \left[ \frac{(s^2 + \omega^2) - \omega^2}{s^2 + \omega^2} - \frac{1}{T_1} \cdot \frac{s}{s^2 + \omega^2} - \frac{s}{\left(s + \frac{1}{T_1}\right)} \right] = \\ &= \frac{\alpha_1 \cdot P_x(s) \cdot \omega}{\left(\frac{1}{T_1^2} + \omega^2\right)} \cdot \left[ \omega \cdot \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} + \frac{1}{T_1} \cdot \frac{s}{s^2 + \omega^2} - \frac{1}{T_1} \cdot \frac{1}{\left(s + \frac{1}{T_1}\right)} \right]. \end{aligned}$$

Определяем оригинал функции по этому выражению

$$\begin{aligned} G_1(t) &= \frac{\alpha_1 \cdot P_x(t) \cdot \omega}{\left(\frac{1}{T_1^2} + \omega^2\right)} \cdot \left[ \omega \cdot \sin(\omega t) + \frac{1}{T_1} \cdot \cos(\omega t) - \frac{1}{T_1} e^{-\frac{1}{T_1} t} \right] \\ \text{или } G_1(t) &= \frac{\alpha_1 \cdot P_x(t) \cdot \omega T_1}{(1 + \omega^2 T_1^2)} \cdot \left[ T_1 \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) + \cos(\omega t) - e^{-\frac{1}{T_1} t} \right]. \quad (9) \end{aligned}$$

Определим давление в газовой полости 1 (рисунок 2), приравнявая расходы газов  $G_1(s)$  по выражениям (2) и (4)

$$\alpha_1 \cdot P_x(s) \cdot \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} - P_k(s) \cdot \alpha_1 = \frac{V_k}{RT} \cdot s \cdot P_k(s).$$

Из этого выражения определяем

$$P_k(s) \cdot \alpha_1 \cdot \left[ \frac{V_k}{\alpha_1 \cdot RT} \cdot s + 1 \right] = \alpha_1 \cdot P_x(s) \cdot \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}.$$

В соответствии с (7)  $\frac{V_k}{\alpha_1 \cdot RT} = T_1$ , тогда  $P_k(s) = \frac{\omega}{(T_1 \cdot s + 1)} \cdot \frac{1}{(s^2 + \omega^2)} \cdot P_x(s)$ .

Это выражение можно представить в виде

$$\begin{aligned} P_k(s) &= \left[ \frac{\omega}{(T_1 \cdot s + 1)} \cdot \frac{1}{(s^2 + \omega^2)} \right] \cdot P_x(s) = \frac{1}{T_1} \omega \cdot \left[ \frac{1}{\left(s + \frac{1}{T_1}\right)} \cdot \frac{1}{(s^2 + \omega^2)} \right] \cdot P_x(s) = \\ &= \frac{1}{T_1} \omega \cdot \left(s - \frac{1}{T_1}\right) \left[ \frac{1}{\left(s^2 - \frac{1}{T_1^2}\right)} - \frac{1}{(s^2 + \omega^2)} \right] \cdot \frac{1}{\left(\omega^2 + \frac{1}{T_1^2}\right)} \cdot P_x(s) = \\ &= \frac{1}{T_1} \frac{\omega}{\left(\omega^2 + \frac{1}{T_1^2}\right)} \cdot \left[ -\frac{s}{(s^2 + \omega^2)} + \frac{1}{\omega \cdot T_1} \frac{\omega}{(s^2 + \omega^2)} + \frac{1}{\left(s + \frac{1}{T_1}\right)} \right] \cdot P_x(s). \end{aligned} \quad (10)$$

Переходим от изображений функции (10) к оригиналу

$$P_k(t) = \frac{1}{T_1} \frac{\omega}{\left(\omega^2 + \frac{1}{T_1^2}\right)} \cdot \left[ -\cos \omega t + \frac{1}{\omega \cdot T_1} \sin \omega t + e^{-\frac{1}{T_1}t} \right] \cdot P_x(t)$$

или

$$P_k(t) = \frac{\omega \cdot T_1}{(T_1^2 \cdot \omega^2 + 1)} \cdot \left[ \frac{1}{\omega \cdot T_1} \sin \omega t - \cos \omega t + e^{-\frac{1}{T_1}t} \right] \cdot P_x(t), \quad (11)$$

где  $P_x(t)$  - амплитуда колебательного давления в точке А (рисунок 2).

Из выражений (9) и (11) следует, что расход водяного пара в газовую полость 1 (рисунок 2) при подключении ее через сопротивление зависит от давления  $P_x(t)$  перед

сопротивлением  $2$  с проводимостью  $\alpha_1$  и частоты изменения давления  $\omega$ . Если частота  $\omega$  изменения переменной составляющей парогазовой смеси равна нулю, тогда расход парогазовой смеси в газовую полость равен нулю и перемещения парогазовой смеси из линии подвода водяного пара в пору не будет происходить. Только при наличии переменной составляющей в давлении водяного пара, подводимого в реактор, происходит непрерывное изменение давления в газовой полости, непрерывно изменяется расход водяного пара между поровыми объемами и основными потоками водяного пара в реакторе.

Подвод водяного пара в реактор при периодических изменениях давления способствует более интенсивному и равномерному превращению углеродного остатка пиролиза изношенных шин в сорбент органических соединений в реакторе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. –440 с.
2. Патент на изобретение № 2396208 РФ. Способ получения сорбента органических соединений. Авторы изобретения Н.И. Жежера, С.А. Тямкин, Д.А. Перепеляков. Приоритет от 11.01.2009 г. Опубл. 10.08.2010. Бюл. №22.
3. Патент на изобретение № 2456236 РФ. Способ получения сорбента органических соединений. Авторы изобретения Н.И. Жежера, Н.Г. Самойлов. Приоритет от 09.02.2011 г. Опубл. 20.07.2012. Бюл. №20.

**Рецензент:** Сердюк Анатолий Иванович, директор Аэрокосмического института ФГБОУ Оренбургский государственный университет, доктор технических наук.