

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ УГЛЯ ШНЕКОВЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ В АГРЕГАТЕ КИПЯЩЕГО СЛОЯ

А. Асанов<sup>1\*</sup>, Б. Мекенбаев<sup>2</sup>, Д. Чалыбеков<sup>1</sup>, Ж. Арзиев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Кафедра эксплуатации транспортных и технологических машин, Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова, Бишкек, Кыргызстан

<sup>2</sup>Кафедра прикладной информатики, Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова, Бишкек, Кыргызстан

<sup>3</sup>Институт природных ресурсов им. А.С. Джаманбаева Национальной академии наук Кыргызской Республики, Ош, Кыргызстан

\*Ответственный автор: e-mail [asanov52@mail.ru](mailto:asanov52@mail.ru), тел. +996545717

## STUDY OF THE PROCESS OF COAL TRANSFER BY MEANS OF AUGER EFFECTOR WITHIN THE AGGREGATE OF BOILING BED

A. Asanov<sup>1\*</sup>, B. Mekenbaev<sup>2</sup>, D. Chalybekov<sup>1</sup>, J. Arziev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Exploitation of Transport and Technological Machines Department, Kyrgyz State University of Construction, Transportation and Architecture named after N. Isanov, Bishkek, Kyrgyzstan

<sup>2</sup>Applied Informatics Department, Kyrgyz State University of Construction, Transportation and Architecture named after N. Isanov, Bishkek, Kyrgyzstan

<sup>3</sup>Institute of Natural Resources named after A.S. Djamanbaev of the National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic, Osh, Kyrgyzstan

\*Corresponding author: e-mail [asanov52@mail.ru](mailto:asanov52@mail.ru), tel. +996545717

### ABSTRACT

**Purpose.** The development and analysis of operation of a boiling bed aggregate with auger effector to feed and transfer coal inside a working chamber in the process of its thermal destruction.

**Methods.** Method of graph theory has been applied to develop dynamic operation schedule of a mechanism to feed coal into a reactor of boiling bed. Mathcad system has been used to study mathematical model of operation of aggregate with a reactor of boiling bed. The results of the solution of a system of normal differential equations have been implemented by means of Runge-Kutta method with the preset adaptive pitch.

**Findings.** A system of differential equations describing operations of mechanism to feed loose medium in a reactor and behaviour of a drive components with the application of  $M_{dv}$  moment to engine rotor and application of  $M_c$  resistance moment to a auger mechanism has been developed. Results of the auger drive modeling has shown that the engine acceleration and output of a rotor of a feeding mechanism engine as well as coal transfer within BB reactor to a nominal rotation frequency takes place almost after 0.5 sec; then, the auger rotates under stable mode with constant angular velocity.

**Originality.** Mathematical model describing operation of auger effector to feed coal and transfer it inside the reactor of boiling bed has been developed in the form of a system of differential equations. New dependences of changes in temporal angular body movements have been determined.

**Practical implications.** A combined device for coal pyrolysis and gasification making it possible to obtain continuously associated combustible gas in addition to a coking product has been designed. Methodological approach developed relative to complicated mechanical systems help obtain information concerning interrelations of its basic parameters involving structural features at the stage of the studied object design.

**Keywords:** aggregate, auger, pyrolysis, semicoke, model, dynamics

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В работе предлагается к реализации в производстве отечественной технологии комплексного получения полукокса и газа с применением техники кипящего слоя. Использование техники кипящего слоя в углеперерабатывающих установках позволяет существенно сократить объем затрат на их реализацию

и получить компактный экономичный и экологичный агрегат для одновременного производства полукокса, горючего газа и тепла (Dai, Ma, Liu, & Liu, 2015; Zhang & Zheng, 2016; Dubinin, Turponogov, & Kagramanov, 2017; Solimene et al., 2017).

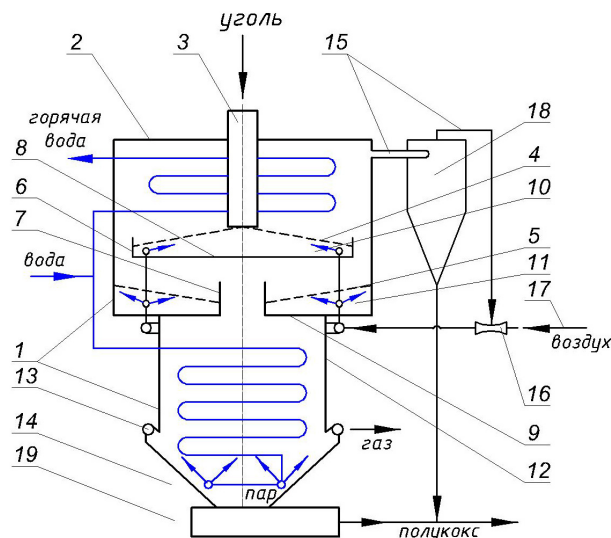
Известны различные агрегаты с соответствующей конструкцией для пиролиза углей (Werther, 2007;

Eigenberger, 2008; Werther, 2008). Основное требование к агрегатам, в которых происходит полукоксование – равномерность обогрева обрабатываемого угля (Joutsenoja, Heino, Hernberg, & Bonn, 1999; Li, Hu, & Zong, 2013; Arena & Di Gregorio, 2014). Для этого используются агрегаты с внутренним подводом тепла, когда газовый или твердый теплоноситель подается непосредственно в него, и внешним подводом тепла, когда теплоноситель нагревает стенки камеры, в которой находится уголь (Falshtynskyy, Dychkovskyy, Lozynskyy, & Saik, 2012; Li et al., 2016; Zhang & Zheng, 2016). Существуют агрегаты, в которых полукоксование угля осуществляется в автотермическом процессе за счет тепла от сжигания летучих продуктов пиролиза угольных веществ и части угля или полукокка (Asanov, Asanova, & Orozov, 2016). Процесс автотермического нагрева и сжигания осуществляется в кольцевых печах (Linev, Deberdeev, & Davydov, 2007), в барабанных печах (Strakhov, Surovtseva, D'yachenko, & Men'shenin, 2007) и на колосниковых решетках (Proshunin & Shkoller, 2012). Агрегаты с колосниковой решеткой наиболее пригодны для создания в них кипящего слоя.

За рубежом в последние годы развитие получили высокопроизводительные технологии в пылевидном потоке, где возможно перерабатывать мелкодисперсный уголь (Syskov & Mashenkov, 1973; Robertson, Domeracki, Horazak, Newby, & Rehmat, 1996; Shkoller, 2001; Islamov, 2010). Для этой цели предпочтение получают пиролизные агрегаты со шнековыми рабочими органами. Характерной особенностью этих машин является то, что их загрузка и разгрузка угольным сырьём происходит без остановки при непрерывном движении рабочего органа. Шнековые органы характеризуются простотой, компактностью и надежностью конструкций, низкой стоимостью, простотой изготовления и удобством обслуживания. Ими транспортируются на сравнительно небольшие расстояния в основном пылевидные и зернистые насыпные, а также вязкие и тестообразные материалы. Они нашли широкое применение в конструкциях оборудования и агрегатов: питателях, и дозаторах, обеспыливающих и засыпных устройствах, прессах и т. п. На основе предыдущих исследований сделан вывод, о возможности использования шнековых рабочих органов и в конструкциях пиролизных установок для переработки угля.

## 2. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

На Рисунке 1 приведена одна из вариантов схемы аппаратного оформления процессов термической деструкции угля, с использованием шнековых рабочих органов (Asanov, Asanova, Chalybekov, Moldobaev, & Alisher, 2016). Отличительной особенностью этой схемы является то, что вертикальный шнековый орган используется не только для подачи угля в реактор кипящего слоя, но и перемещения угля по газораспределительной решетке в горизонтально-радиальном направлении. Подача фракционированного угля в рабочую камеру при помощи вертикально смонтированного шнекового механизма позволяет отказаться от отдельного силового блока для подачи топлива в кипящий слой и его перемещения по газораспределительной решетке и упростить конструкцию.



**Рисунок 1.** Принципиальная схема агрегата с реактором с кипящего слоя: 1 – составные части установки; 2 – цилиндрический реактор; 3 – шнек; 4, 5 – газораспределительные кольцеобразные решетки; 6, 7 – переливные стенки; 8, 9 – кольцеобразные диски; 10, 11 – камеры; 12 – пиролизер; 13 – фурмы для дутья насыщенного пара; 14 – коллектор для отвода генерируемого газа; 15 – эжектор; 16 – трубопровод отсоса; 17 – линия подачи воздуха; 18 – циклон; 19 – шнек для отвода полукокка

Кроме того, шнек предохраняет от прорыва части дымовых газов через слой топлива при загрузке. Другая камера в нижней части агрегата используется для сбора коксового продукта, размещенная в ней водяная рубашка служит для охлаждения и управления температурным режимом реализуемого в ней процесса газификации коксового продукта с использованием в качестве окислителя водяного пара.

Шнек выполняет двойную функцию, он используется для вертикального транспортирования угля и проталкивания угольной массы по горизонтальной кольцеобразной решетке. Причем при перемещении массы угля за счет термической деструкции уменьшается его масса, а за счет ожигания угольных частиц в кипящем слое изменяется характер их движения в камере и сопротивление к движению частиц угля.

Таким образом, в агрегате для переработки угля в коксовый продукт и газ с использованием шнековых рабочих органов (для вывода полукокка, также использован шнек) достигаются непрерывность процессов подачи и перемещения угля в процессе их пиролиза и вывода полученного продукта из агрегата. Сами шнеки работают в специфических условиях при воздействии высоких температур и вредной окружающей среды. Учитывая специфику работ оборудования со шнековыми рабочими органами, сформируем дальнейшие задачи теоретических исследований процесса транспортирования крупнозернистого угля в следующем виде:

- исследование динамики шнекового рабочего органа в агрегате кипящего слоя;
- обоснование оптимальных конструкционных параметров шнеков, используемых для перемещения угля в агрегатах углепереработки;

– выбор рациональных режимов работы шнеков, согласованных с технологическими параметрами агрегатов коксования и газификации;

– определение технико-энергетических параметров шнеков, применяемых в агрегатах термической деструкции угля.

Эти задачи взаимосвязаны между собой, в рамках настоящей статьи рассматривается динамика шнекового рабочего органа в агрегате кипящего слоя.

Объект исследования, согласно принципиальной схеме агрегата с реактором кипящего слоя, приведённой на Рисунке 1, включает в себя двигатель, механическую передачу и исполнительный орган в виде шнекового механизма. Он относится к механическим приводам, состоящих из совокупности вращающихся тел, для получения на выходе определенных соотношений между вращающим моментом –  $M$  и скоростью исполнительного органа –  $\omega$ , представляющего шнековый механизм, который выполняет функцию не только конвейера подачи сыпучей среды в реактор, но и пресса для перемещения этой среды по кольцеобразной поверхности колосниковой решетки.

### 3. СОЗДАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Движение механического привода шнека описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, а его свойства в основном определяются такими параметрами как момент инерции движущихся масс –  $I_1$ ; коэффициенты трения (диссипации –  $\mu_1$ ) и упругости –  $c_1$ . При этом искомыми параметрами являются угловые координаты –  $\varphi_1$ ; и скорости –  $\dot{\varphi}_1$  тел вращения.

Из работы (Kudryavtsev, 2008) известно, что потери в такой механической системе, связанные с диссипативными явлениями, и учитывают рассеивание части кинетической энергии тел вращения. Эти потери пропорциональны изменениям угловых скоростей между двумя смежными телами и представлены в виде  $\mu_1(\varphi_1 - \varphi_{1+1})$ . Потери, связанные с упругими свойствами пропорциональны изменениям угловых координат между двумя смежными телами, их представляют в виде  $c_1(\varphi_1 - \varphi_{1+1})$ . Учитывая все это, расчетную динамическую схему механической системы подачи среды в реактор кипящего слоя представим в виде размеченного графа состояний, приведенного на Рисунке 2.

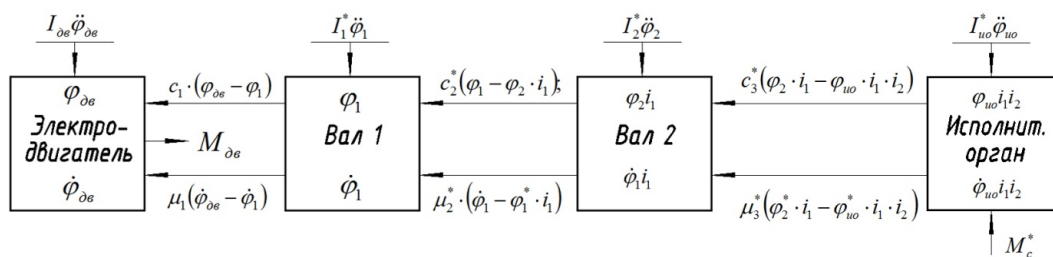


Рисунок 2. Динамическая схема работы механизма подачи угля в виде размеченного графа состояний взаимодействующих тел

Динамическая схема работы шнекового механизма включает следующие обозначения:

$I_{дв}, I_1, I_2, I_{ш}$  – моменты инерции соответственно тел: ротор двигателя и полумуфта (электродвигатель); полумуфта и входной вал редуктора (вал 1); выходной вал (вал 2) редуктора с полумуфтой, полумуфта и шнек (исполнительный орган);

$\ddot{\varphi}_{дв}, \ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_2, \ddot{\varphi}_{ш}$  – угловые ускорения соответствующих тел;

$\dot{\varphi}_{дв}, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_{ш}$  – угловые скорости соответствующих тел;

$\varphi_{дв}, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_{ш}$  – углы поворота соответствующих тел;

$M_{дв}$  – крутящий момент двигателя;

$c_1, c_2, c_3$  – коэффициенты жесткости соответствующих тел;

$\mu_1, \mu_2, \mu_3$  – коэффициенты диссипации соответствующих тел;

$M_c$  – момент сопротивления;

$i_1, i_2$  – передаточные числа 1-ой и 2-ой ступеней редуктора.

Обозначения, помеченные звездочкой, – это приведенные значения соответствующих величин.

Прямоугольник графа – это тело исследуемой механической системы со своими кинематическими и динамическими параметрами. Стрелки, входящие

или входящие из прямоугольника, это действующие моменты для тел вращения, они определяют собой реактивные и активные моменты, связанные с диссипативными и упругими свойствами тела. Величины, связанные с диссипативными и упругими свойствами тела, зависят от свойства смежных тел, с которым взаимодействует каждое тело. Кроме того, на первое и последнее тела, соответственно, действуют активный момент (сила) от двигателя и реактивный момент (сила) сопротивления на исполнительный (рабочий) орган механической системы.

Для составления дифференциальных уравнений, описывающих работу механической системы, воспользуемся следующим мнемоническим правилом (Kudryavtsev, 2008): для каждого тела механической системы составляется дифференциальное уравнение второго порядка; число членов уравнения равно числу стрелок, входящих или выходящих из рассматриваемого тела; каждый член уравнения имеет свой знак. Если стрелка направлена в тело, то член берется со знаком плюс, если из тела, то со знаком минус; первый член суммы для каждого  $i$ -ого тела равен  $I_i \cdot \ddot{\varphi}_i$ ; члены для стрелок, связывающих два смежных тела механической системы, равны произведению коэффициента жесткости или диссипации тела системы, из которого выходит стрелка, на разность искомым

параметров по данной стрелке, с учетом передаточных чисел смежных тел системы.

Используя мнемоническое правило, составлена система дифференциальных уравнений, описывающих работу механизма подачи сыпучей среды в реактор в виде:

$$\begin{aligned} I_{\partial\delta} \cdot \ddot{\varphi}_{\partial\delta} + c_1 \cdot (\varphi_{\partial\delta} - \varphi_1) + \mu_1 \cdot (\dot{\varphi}_{\partial\delta} - \dot{\varphi}_1) - M_{\partial\delta} &= 0; \\ I_1^* \cdot \ddot{\varphi}_1 + c_2^* \cdot (\varphi_1 - \varphi_2 \cdot i_1) + \mu_2^* \cdot (\dot{\varphi}_1 - \varphi_1^* \cdot i_1) - \\ - c_1 \cdot (\varphi_{\partial\delta} - \varphi_1) - \mu_1 \cdot (\dot{\varphi}_{\partial\delta} - \dot{\varphi}_1) &= 0; \\ I_2^* \cdot \ddot{\varphi}_2 + c_3^* \cdot (\varphi_2 \cdot i_1 - \varphi_{uo} \cdot i_1 \cdot i_2) + \mu_3^* \cdot (\dot{\varphi}_2^* \cdot i_1 - \varphi_{uo}^* \times \\ \times i_1 \cdot i_2) - c_2^* \cdot (\varphi_1 - \varphi_2 \cdot i_1) - \mu_2^* \cdot (\dot{\varphi}_1 - \varphi_2^* \cdot i_1) &= 0; \\ I_{uo}^* \cdot \ddot{\varphi}_{uo} - c_3^* \cdot (\varphi_2 \cdot i_1 - \varphi_{uo} \cdot i_1 \cdot i_2) - \\ - \mu_3^* \cdot (\dot{\varphi}_2^* \cdot i_1 - \varphi_{uo}^* \cdot i_1 \cdot i_2) + M_c^* &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Эта система полностью описывает поведение элементов привода при приложении к ротору двигателя момента  $M_{\partial\delta}$ , а к шнековому механизму момента сопротивления  $M_c$ .

Для облегчения решения данной системы представим ее в виде системы дифференциальных уравнений, состоящей не из четырех дифференциальных уравнений второго порядка, а из восьми дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_{\partial\delta}}{dt} = \dot{\varphi}_{\partial\delta}; \quad \frac{d\varphi_1}{dt} = \dot{\varphi}_1; \quad \frac{d\varphi_2}{dt} = \dot{\varphi}_2; \quad \frac{d\varphi_{uo}}{dt} = \dot{\varphi}_{uo}; \\ I_{\partial\delta} \cdot \ddot{\varphi}_{\partial\delta} + c_1 \cdot (\varphi_{\partial\delta} - \varphi_1) + \mu_1 \cdot (\dot{\varphi}_{\partial\delta} - \dot{\varphi}_1) - M_{\partial\delta} &= 0; \\ I_1^* \cdot \ddot{\varphi}_1 + c_2^* \cdot (\varphi_1 - \varphi_2 \cdot i_1) + \mu_2^* \cdot (\dot{\varphi}_1 - \varphi_1^* \cdot i_1) - \\ - c_1 \cdot (\varphi_{\partial\delta} - \varphi_1) - \mu_1 \cdot (\dot{\varphi}_{\partial\delta} - \dot{\varphi}_1) &= 0; \\ I_2^* \cdot \ddot{\varphi}_2 + c_3^* \cdot (\varphi_2 \cdot i_1 - \varphi_{uo} \cdot i_1 \cdot i_2) + \\ + \mu_3^* \cdot (\dot{\varphi}_2^* \cdot i_1 - \varphi_{uo}^* \cdot i_1 \cdot i_2) - c_2^* \cdot (\varphi_1 - \varphi_2 \cdot i_1) - \\ - \mu_2^* \cdot (\dot{\varphi}_1 - \varphi_2^* \cdot i_1) &= 0; \\ I_{uo}^* \cdot \ddot{\varphi}_{uo} - c_3^* \cdot (\varphi_2 \cdot i_1 - \varphi_{uo} \cdot i_1 \cdot i_2) - \\ - \mu_3^* \cdot (\dot{\varphi}_2^* \cdot i_1 - \varphi_{uo}^* \cdot i_1 \cdot i_2) + M_c^* &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Система полученных уравнений (2) представляет собой математическую модель объекта исследования. Для проведения дальнейшего динамического анализа объекта исследования, согласно разработанной математической модели, необходимо определить и задаться исходными данными. Как уже было отмечено выше, в качестве исполнительного органа в механической системе выступает шнековым механизм, исполняющий двоякую функцию.

Исследование математической модели объекта проведено в системе Mathcad. Результаты решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений реализованы методом Рунге-Кутты с заданным адаптивным шагом. Для моделирования динамики объекта определены:

- моменты инерции всех движущихся деталей механизма (объединенных сил) и их приведенные значения к валу двигателя;
- коэффициенты жесткости соединения движущихся взаимодействующих деталей, объединенных тел и их приведенные значения к валу двигателя;

– коэффициенты диссипации движущихся деталей, объединенных тел и их приведенные значения к валу двигателя;

– моменты (силы) сопротивления и их приведенные значения.

Для численного представления исходных данных использованы известные зависимости. Например, для определения механической характеристики двигателя использована зависимость в таком виде:

$$M_{\partial\delta}(\omega) = \frac{2M_{\max}}{1 - \frac{\omega}{\omega_n} + \frac{S_k}{1 - \frac{\omega}{\omega_n}}}, \quad (3)$$

где:

- $M_{\max}$  – максимальный момент двигателя;
- $\omega$  – угловая скорость вращения ротора двигателя;
- $\omega_n$  – номинальная угловая скорость ротора двигателя;
- $S_k$  – значение критического скольжения.

Момент инерции шнекового рабочего органа определяли по формуле:

$$J_1 = J_{\partial\delta} + J_p + \frac{J_{u.в}}{i_{pl}^2} + \left( \frac{J_{zл}}{\omega_в \cdot i_{pl}} \right) + m_{zл} \cdot \left( \frac{v_{zл}}{\omega_в \cdot i_{pl}} \right)^2, \quad (4)$$

где:

- $J_{\partial\delta}$  – момент инерции двигателя;
- $J_p$  – момент инерции редуктора;
- $J_{u.в}$  – момент инерции шнекового вала;
- $i_{pl}$  – передаточное число редуктора;
- $J_{zл}$  – момент инерции глиняной массы;
- $m_{zл}$  – масса глины, находящейся в прессе;
- $v_{zл}$  – скорость поступательного движения глины;
- $\omega_в$  – угловая скорость шнекового вала;
- $\omega_{zл}$  – максимальная угловая скорость вращательного движения глины.

Графическое представление искомых параметров в зависимости от времени приведены на Рисунках 3 и 4.

Анализируя результаты моделирования привода шнека, можно отметить, что разгон двигателя и выход ротора двигателя механизма подачи и перемещения угля в реакторе КС на номинальную частоту вращения происходит примерно через 0.5 секунд. После чего вращение шнека проводится в установленном режиме с постоянной угловой скоростью.

#### 4. ВЫВОДЫ

Предложен агрегат с реактором кипящего слоя для термической деструкции угля. Отличительной особенностью этой установки является то, что вертикальный шнековый орган используется не только для подачи угля в реактор кипящего слоя, но и перемещения угля по газораспределительной решетке в горизонтально-радиальном направлении. Подача фракционированного угля в рабочую камеру при помощи вертикально смонтированного шнекового механизма позволяет отказаться от отдельного силового блока для подачи топлива в кипящий слой и его перемещение по газораспределительной решетке и упростить конструкцию.

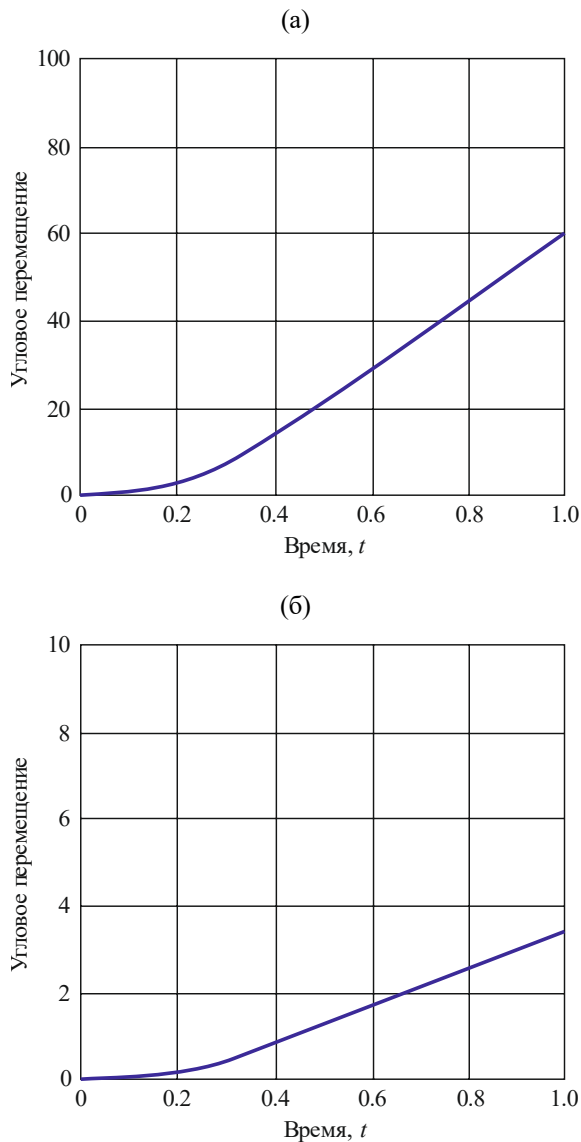


Рисунок 3. Графики зависимостей угловых перемещений тел от времени  $t$ : (а) ротор двигателя ( $x_0$ ); (б) исполнительный орган (шнек) ( $x_3$ )

Разработана математическая модель объекта исследования в виде системы дифференциальных уравнений, описывающая работу шнекового рабочего органа для подачи угля и перемещения его внутри реактора кипящего слоя. Моделирование процесса подачи и перемещения угля внутри реактора на основе полученных аналитических зависимостей и исходных данных позволило исследовать динамику шнекового механизма установки для термической деструкции угля. Выбор рациональных параметров такой установки является предметом дальнейших исследований.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено в Кыргызском государственном университете строительства, транспорта и архитектуры за счет грантового финансирования Министерства образования и науки Кыргызской Республики (проект №37 – 2017).

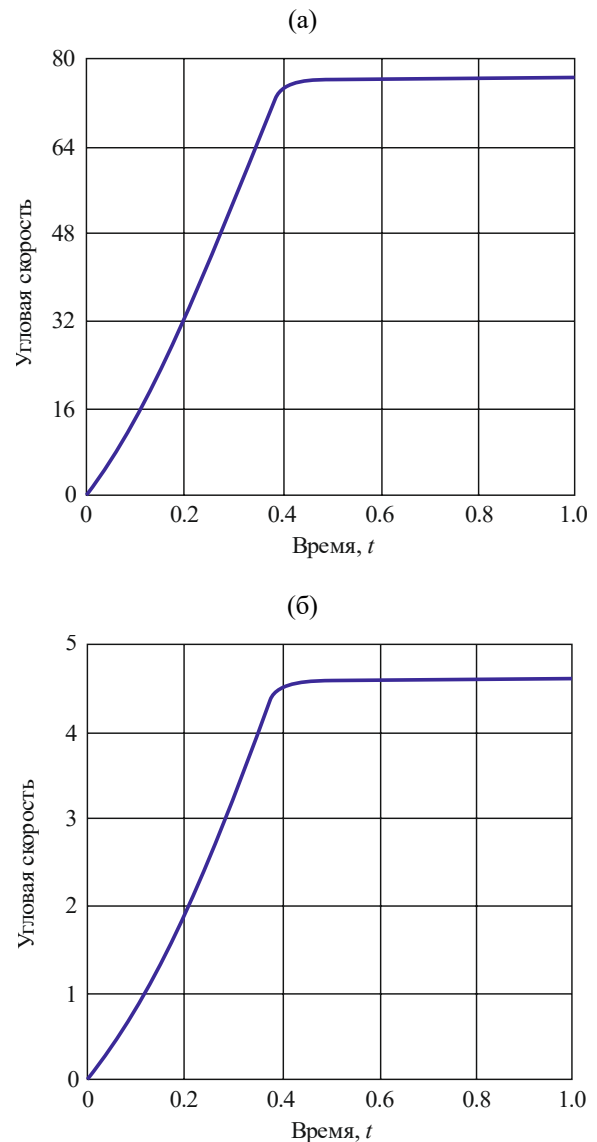


Рисунок 4. Графики зависимости угловых скоростей тел от времени  $t$ : (а) ротор двигателя ( $x_4$ ); (б) исполнительный орган (шнек) ( $x_7$ )

#### REFERENCES

- Arena, U., & Di Gregorio, F. (2014). Gasification of a Solid Recovered Fuel in a Pilot Scale Fluidized Bed Reactor. *Fuel*, (117), 528-536. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.044>
- Asanov, A.A., Asanova, A.A., Chalybekov, D.Ch., Moldobaev, E.B., & Alisher, A. (2016). *Kombinirovannoe ustroystvo dlya piroliza i gazifikatsii uglja*. Patent No. 1834, Kyrgyzskaya Respublika.
- Asanov, A.A., Asanova, K.K., & Orozov, A.A. (2016). Razvitie sovremennykh ugol'nykh tekhnologiy v Kyrgyzstane. *Gornyy Zhurnal*, (6), 61-65.
- Dai, C., Ma, S., Liu, X., & Liu, X. (2015). Study on the Pyrolysis Kinetics of Blended Coal in the Fluidized-bed Reactor. *Procedia Engineering*, (102), 1736-1741. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.309>
- Dubin, A.M., Tuponogov, V.G., & Kagramanov, Y.A. (2017). Air-Based Coal Gasification in a Two-Chamber Gas Reactor with Circulating Fluidized Bed. *Thermal Engineering*, 64(1), 46-52. <https://doi.org/10.1134/s0040601517010013>

- Eigenberger, G. (2008). *Catalytic Fixed-Bed Reactors*. Handbook of Heterogeneous Catalysis. <https://doi.org/10.1002/9783527610044.hetcat0111>
- Falshtynskyy, V., Dychkovskyy, R., Lozynskyy, V., & Saik, P. (2012). New Method for Justification the Technological Parameters of Coal Gasification in the Test Setting. *Geomechanical Processes During Underground Mining*, 201-208. <https://doi.org/10.1201/b13157-35>
- Joutsenoja, T., Heino, P., Hernberg, R., & Bonn, B. (1999). Pyrometric Temperature and Size Measurements of Burning Coal Particles in a Fluidized Bed Combustion Reactor. *Combustion and Flame*, 118(4), 707-717. [https://doi.org/10.1016/s0010-2180\(99\)00028-0](https://doi.org/10.1016/s0010-2180(99)00028-0)
- Islamov, S.R. (2010). *Energotekhnologicheskaya pererabotka uglja*. Krasnoyarsk: Polikor.
- Kudryavtsev, E.M. (2008). *Modelirovanie, proektirovanie i raschet mekhanicheskikh sistem*. Moskva: DMK Press.
- Li, S., Hu, Y., & Zong, X.J. (2013). Model Predictive Control of Circulating Fluidized Bed Coal Combustor. *Advanced Materials Research*, (846-847), 73-76. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.846-847.73>
- Li, C., Fang, M., Xiao, P., Shi, Z., Cen, J., Yan, Q., ... Luo, Z. (2016). Investigation of the Evolution Behavior of Light Tar During Bituminous Coal Pyrolysis in a Fluidized Bed Reactor. *Chemical Research in Chinese Universities*, 32(6), 1019-1027. <https://doi.org/10.1007/s40242-016-6091-9>
- Linev, B.I., Deberdeev, I.Kh., & Davydov, M.V. (2007). Sovremennoe sostoyaniye i osnovnyye napravleniya razvitiya tekhniki i tekhnologii glubokogo obogashcheniya uglja. *Gornyy Zhurnal*, (2), 23-29.
- Proshunin, Yu.P., & Shkoller, M.B. (2012). Energotekhnologicheskaya pererabotka burykh ugley s ispol'zovaniem tverdogo teplonositelya. In *Ekologiya i Bezopasnost' v Tekhnosfere* (pp. 83-88). Yurga, Rossiya: Tomskiy politekhnicheskiiy universitet.
- Robertson, A., Domeracki, W., Horazak, D., Newby, D., & Rehmat, A. (1996). Increased Efficiency of Topping Cycle PCFB Power Plants. In *American Power Conference* (pp. 17-25). Chicago, Illinois: Illinois Institute of Technology, Engineering One Building.
- Shkoller, M.B. (2001). *Polukoksovanie kamennykh i burykh ugley*. Novokuznetsk: Inzhenernaya Akademiya Rossii, Kuzbasskiy filial.
- Strakhov, V.M., Surovtseva, I.V., D'yachenko, A.V., & Men'shenin, V.M. (2007). Tekhnologiya proizvodstva i kachestvo polukoksa iz vertikal'nykh pechey tipa SJ Kitaya. *Koks i Khimiya*, (5), 17.
- Solimene, R., Cammarota, A., Chirone, R., Leoni, P., Rossi, N., & Salatino, P. (2017). Combustion of Lignin-Rich Residues with Coal in a Pilot-Scale Bubbling Fluidized Bed Reactor. *Powder Technology*, (316), 718-724. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.063>
- Syskov, K.I., & Mashenkov, O.N. (1973). *Termookislitel'noe koksovanie ugley*. Moskva: Metallurgiya.
- Werther, J. (2007). *Fluidized-Bed Reactors*. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. [https://doi.org/10.1002/14356007.b04\\_239](https://doi.org/10.1002/14356007.b04_239)
- Werther, J. (2008). *Fluidized-Bed Reactors*. A List of Abbreviations/Acronyms Used in the Text is Provided at the End of the Chapter. Handbook of Heterogeneous Catalysis. <https://doi.org/10.1002/9783527610044.hetcat0112>
- Zhang, Y., & Zheng, Y. (2016). Co-Gasification of Coal and Biomass in a Fixed Bed Reactor with Separate and Mixed Bed Configurations. *Fuel*, (183), 132-138. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.066>

## ABSTRACT (IN RUSSIAN)

**Цель.** Разработка и исследование работы агрегата кипящего слоя со шнековым рабочим органом для подачи и перемещения угля внутри рабочей камеры в процессе его термической деструкции.

**Методика.** Для составления динамической схемы работы механизма подачи угля в реактор кипящего слоя применен метод теории графов. Исследование математической модели работы агрегата с реактором кипящего слоя выполнено в системе Mathcad. Результаты решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений реализованы методом Рунге-Кутты с заданным адаптивным шагом.

**Результаты.** Составлена система дифференциальных уравнений, описывающих работу механизма подачи сыпучей среды в реакторе и поведение элементов привода при приложении к ротору двигателя момента  $M_{0e}$ , а к шнековому механизму – момента сопротивления  $M_c$ . Результаты моделирования привода шнека показали, что разгон двигателя и выход ротора двигателя механизма подачи и перемещения угля в реакторе КС на номинальную частоту вращения происходит примерно через 0.5 с, после чего вращение шнека проводится в установившемся режиме с постоянной угловой скоростью.

**Научная новизна.** Разработана математическая модель, описывающая работу шнекового рабочего органа для подачи угля и перемещения его внутри реактора кипящего слоя в виде системы дифференциальных уравнений. Установлены новые зависимости изменения угловых перемещений тел во времени.

**Практическая значимость.** Разработана конструкция комбинированного устройства для пиролиза и газификации угля, позволяющая непрерывно получать помимо коксового продукта попутный горючий газ. Методический подход, разработанный применительно к сложным механическим системам, позволяет на стадии проектирования объекта исследования получить информацию о взаимосвязях его основных параметров с учетом конструктивных особенностей.

**Ключевые слова:** агрегат, шнек, пиролиз, полукокс, модель, динамика

## ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

**Мета.** Розробка та дослідження роботи агрегату киплячого шару зі шнековим робочим органом для подачі й переміщення вугілля всередині робочої камери у процесі його термічної деструкції.

**Методика.** Для складання динамічної схеми роботи механізму подачі вугілля в реактор киплячого шару застосовано метод теорії графів. Дослідження математичної моделі роботи агрегату з реактором киплячого шару виконано в системі Mathcad. Результати рішення системи звичайних диференціальних рівнянь реалізовані методом Рунге-Кутта із заданим адаптивним кроком.

**Результати.** Складена система диференціальних рівнянь, що описує роботу механізму подачі сипучого середовища в реакторі та поведінку елементів приводу при додаванні до ротора двигуна моменту  $M_{об}$ , а до шнековому механізму – моменту опору  $M_o$ . Результати моделювання приводу шнека показали, що розгін двигуна і вихід ротора двигуна механізму подачі й переміщення вугілля в реакторі КС на номінальну частоту обертання відбувається приблизно через 0.5 с, після чого обертання шнека проводиться в сталому режимі з постійною кутовою швидкістю.

**Наукова новизна.** Розроблено математичну модель, що описує роботу шнекового робочого органу для подачі вугілля і переміщення його всередині реактора киплячого шару у вигляді системи диференціальних рівнянь. Встановлено нові аналітичні залежності зміни кутових переміщень тіл з часом.

**Практична значимість.** Розроблено конструкцію комбінованого пристрою для піролізу і газифікації вугілля, що дозволяє безперервно отримувати крім коксового продукту попутний горючий газ. Методичні підхід, розроблений стосовно до складних механічних систем, дозволяє на стадії проектування об'єкта дослідження отримати інформацію про взаємозв'язки його основних параметрів із урахуванням конструктивних особливостей.

**Ключові слова:** агрегат, шнек, піроліз, напівкокс, модель, динаміка

## ARTICLE INFO

Received: 21 October 2017

Accepted: 6 December 2017

Available online: 8 December 2017

## ABOUT AUTHORS

Arstanbek Asanov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Exploitation of Transport and Technological Machines Department, Kyrgyz State University of Construction, Transportation and Architecture named after N. Isanov, 34 b Maldybaev St, 720031, Bishkek, Kyrgyzstan. E-mail: [asanov52@mail.ru](mailto:asanov52@mail.ru)

Bakyt Mekenbaev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Applied Informatics Department, Kyrgyz State University of Construction, Transportation and Architecture named after N. Isanov, 34 b Maldybaev St, 720031, Bishkek, Kyrgyzstan. E-mail: [mekenbt@mail.ru](mailto:mekenbt@mail.ru)

Dastan Chalybekov, Instructor of the Exploitation of Transport and Technological Machines Department, Kyrgyz State University of Construction, Transportation and Architecture named after N. Isanov, 34 b Maldybaev St, 720031, Bishkek, Kyrgyzstan. E-mail: [ds\\_hunt@mail.ru](mailto:ds_hunt@mail.ru)

Joromamat Arziev, Doctor of Technical Sciences, Director of the Institute of Natural Resources named after A.S. Djamanbaev of the National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic, 31 Karimov St, 720035, Osh, Kyrgyzstan. E-mail: [arziev2011@mail.ru](mailto:arziev2011@mail.ru)