

инструкции, служит основанием для ремонта или замены сталевого выпускного канала.

#### **Выводы и перспективы дальнейших исследований**

1. С использованием метода диаграмм связей разработана математическая модель гидродинамических процессов истечения жидкой фазы в системе «жидкая ванна конвертера — сталевого выпускного канал», адекватно описывающая физические процессы, протекающие как в условиях истечения металла из 260-т кислородного конвертера, так и истечения жидкой фазы на холодной модели летки.

2. Разработан модуль функционального оператора гидродинамики движения жидкой фазы в системе «жидкая ванна конвертера — сталевого выпускного канал», который реализован в оболочке Mathcad.

3. Получены численные решения системы дифференциальных уравнений, описывающих гидродинамические процессы в летке. Информация, полученная в результате численных экспериментов, обеспечивает возможность решения задач конструирования сталевого выпускных узлов.

4. Предложенная модель позволяет оценить влияние геометрических параметров выпускного канала на длительность выпуска плавки по ходу кампании конвертера по футеровке. Показано, что уменьшение толщины футеровки кислородного конвертера и, соответственно, длины выпускного канала, приводит к увеличению длительности выпуска расплава из агрегата по окончании плавки. В то же время, в ходе кампании летки её внутренний диаметр увеличивается, что приводит к сокращению продолжительности выпуска.

5. Используемый для построения модели метод диаграмм связей применим для решения более сложных задач и позволяет выполнять расчеты для различных конструкций леток, в том числе для двухкамер-

ных леток с подачей нейтрального газа в её полость с целью реализации углеродного потенциала.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Кулик А.Д. Совершенствование выпуска стали из конвертера / А.Д. Кулик, М.А. Кашеев, А.А. Похвалитый // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – №1. – С. 18–20.
2. Метод диаграмм связи при моделировании гидродинамики выпуска металла из конвертера. Особенности построения топологических структур связи и актуальность применения их в металлургии / В.Т. Тучин, А.Д. Кулик, А.П. Огурцов [и др.] // *Математичне моделювання*. – 2013. – №2(29). – С. 91–95.
3. Влияние геометрических параметров конвертера на процесс выпуска плавки / А.П. Огурцов, А.Д. Кулик, А.А. Похвалитый / 25 міжнародна науково-практична конференція «Інноваційний потенціал світової науки – ХХІ сторіччя», 3-7 березня 2014 р, Запоріжжя, С. 85–89
4. Совершенствование выпуска стали из конвертера. Двухкамерная летка / А.А. Похвалитый, А.П. Огурцов, А.Д. Кулик [и др.] // *Труды тринадцатого конгресса сталеплавильщиков*. (г. Полевское, 12-18 октября 2014 г.). – Москва, 2014. – С. 105–108.
5. Высокотемпературное моделирование выпуска плавки из конвертера с подачей аргона в полость летки / А.А. Похвалитый, А.Д. Кулик, Е.Н. Сигарев [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2016. – №2. – С. 52-57.
6. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип формализации / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов. – М.: Наука, 1979. – 394 с.

пост. 29.06.2017

**Р.К. СТАСЕВИЧ**, к.т.н., доцент

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

### **Математическая модель парового тракта многотопливного котлоагрегата для утилизации метана угольной шахты**

На примере парового котлоагрегата, предлагаемого для утилизации метана угольной шахты показано математическое обоснование взрывоопасного технологического процесса в виде дифференциальных уравнений и комплексной передаточной функции, создающей основу создания системы автоматического управления котлоагрегатом, обеспечивающей безопасность его эксплуатации.

#### **Введение**

ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько», благодаря творческим усилиям ученых и работников ИГТМ НАН Украины и шахты, занимает лидирующее место в мировой практике утилизации метана угольной шахты. Финансовое вложение шахты и НАН Украины, позволили оснастить ее одной из передовых когенерационных станций (КГЭС), которые обеспечивают высокий КПД утилизации шахтного метана и природного газа равный 83 % [1]. Под термином шахтный метан в настоящей статье понимается газ и газовоздушная смесь подземной дегазации с низкой (до 30 %) и средней (до 70 %) концентрации метана, а под термином природный газ, по-

нимается смесь газов с высокой концентрацией метана свыше 90 %, добываемого скважинами пробуренными с поверхности, глубина которых не достигает разрабатываемого угольного пласта на расстоянии не менее 8 м<sub>пл.</sub>

Когенерационная установка шахты обеспечивает гибкое регулирование производительности с высоким КПД, благодаря включению или выключению газовых двигателей мощностью до 4 МВт. На КГЭС вырабатывается электроэнергия и тепловая энергия утилизации выхлопных газов, а также часть газа направляется на заправку автомобильного транспорта. Но для утилизации шахтного метана газовыми двигателями, требуется дополнительная установка по его очистке и осушке.

Кроме того, в действующей КГЭС не решается вопрос утилизации метана вентиляционных струй (МВС) с концентрацией метана менее 1 %. В Украине освоено серийное производство и успешно применяется на металлургических комбинатах многотопливные котлоагрегаты, работающие на природном газе и утилизирующие доменный газ по калорийности схожий с шахтным метаном с концентрацией до 30 %. В таких многотопливных котлоагрегатах успешно может сжигаться без очистки и осушки шахтный метан и природный газ поверхностных скважин. В его воздушный тракт, вместо воздуха может подаваться и сжигаться метан вентиляционных струй с концентрацией менее 1 %.

На когенерационной станции ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько» достигнут наиболее высокий в Украине КПД утилизации метана угольных шахт равный 83 % к выработанной электроэнергии и тепла на обогрев зданий, а также часть метана добытого поверхностными скважинами используется на АГНКС для заправки автомобилей [2—4].

Но для утилизации шахтного метана газовыми двигателями требуется его очистка и осушка. Кроме того, не решается вопрос утилизации метана вентиляционных струй (МВС), с процентным содержанием менее 1%.

В Украине освоено серийное производство и успешно применяются на металлургических комбинатах многотопливные котлоагрегаты, работающие на природном газе и утилизирующие доменный газ, по калорийности схожий с шахтным метаном (концентрация  $CH_4 > 25\%$ ).

В таких многотопливных котлоагрегатах успешно может сжигаться без очистки и осушки шахтный метан, метан добытый поверхностными скважинами с

концентрацией  $CH_4$  90—100 %, а в его воздушный тракт может попадать метан вентиляционных струй с процентным содержанием  $CH_4 > 1\%$ .

Структурно-функциональная схема, предлагаемая нами трикогенерационной станции (ТКГЭС) на базе многотопливного котлоагрегата для утилизации метана угольной шахты представлена на рисунке 1. На вход многотопливного котлоагрегата подается шахтный метан, добытый подземными дегазационными скважинами с низкой концентрацией метана от 10—40 % и природный газ, после двухступенчатого турбодетандера. Для утилизации метана вентиляционных струй, осуществляется его подогрев воздухонагревателями котлоагрегата за счет тепла уходящих дымовых газов.

С выхода котлоагрегата, пар высокого давления — 4 МПа подается на вход паровой турбины на валу которой установлен синхронный генератор, вырабатывающий электроэнергию  $Wэ$ . Пар низкого давления с выходом паровой турбины подается в теплообменник, где вырабатывается тепловая энергия  $Wт$  для отопления надшахтных зданий. Тепло выходящее из теплообменника  $ТО$  подается на холодильную машину (ХМ). На выходе получается холод  $Wх$ , направляемый в подземные горные выработки. Конденсат пара после теплообменника и холодильной машины возвращается в котлоагрегат. На вход котлоагрегата подается также очищенная вода со станции химической водоочистки (ХВО), подогретая в экономайзере теплом уходящих дымовых газов. Газ с высокой концентрацией метана после первой ступени турбодетандера подается на АГНКС и в сепаратор, на выходе которого сжиженный пропан бутан. Выработанный холод после первой и второй ступени турбодетандера также отправляется в шахту для нормализации температуры воздуха.

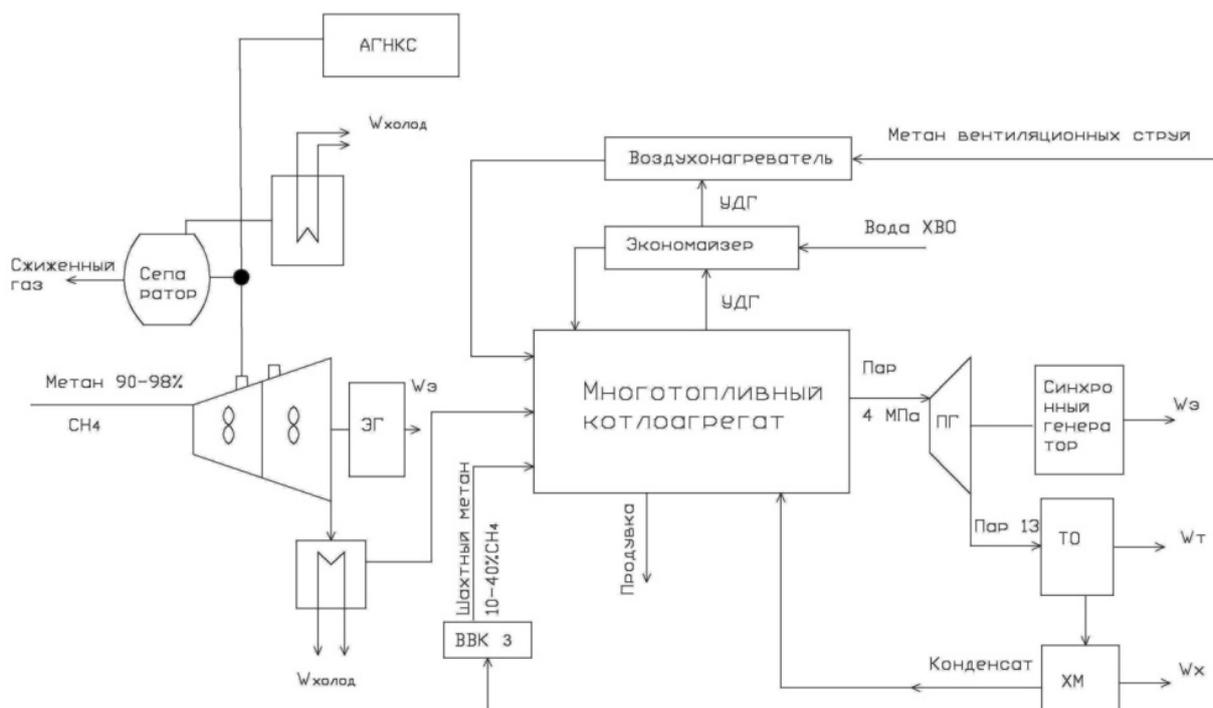


Рис. 1. Структурно-функциональная схема трикогенерационной станции на базе многотопливного котлоагрегата

### Цель работы

Целью работы является обеспечение безопасной эксплуатации взрывоопасных технологических процессов при утилизации метана угольных шахт и доменного газа в металлургии.

### Содержание и результаты

Краткие сведения о взрывоопасности и аварийности котлагрегатов.

Все утилизационные установки сжигающие метановоздушные смеси являются взрывоопасные, в том числе и паровые котлоагрегаты, поэтому для обеспечения безопасности их эксплуатации система контроля и управления должна обеспечить неизменность значений динамических параметров, влияющих на взрывоопасность и аварийность. Поэтому вводится понятие многофакторный динамический критерий безопасности и противоаварийной защиты. Его многофакторность обоснована необходимостью обеспечения безопасности не по одному выбранному параметру, а с учетом всех факторов, которые могут вызвать аварийную или взрывоопасную ситуацию. Динамичность критерия означает то, что контролируется и управляется процесс утилизации не по самим значениям выбранных параметров, а по их отклонениям от регламентных значений в динамически изменяющемся процессе утилизации. Безопасность критерия означает неизменность его значения при допустимых изменениях на входе и выходе процесса утилизации. Обеспечение подачи команд на включение противоаварийной защиты, означает его способность вычислять в динамике процесса взрывоопасности.

Паровые котлоагрегаты относятся к широкому классу объектов управления, статические и динамические характеристики, которые изменяются в широких пределах заранее непредвиденным образом.

Регулирование паропроизводительности котельного агрегата в соответствии с потребляемой нагрузкой производится путем воздействия на подачу в топку топлива и воздуха, необходимого для горения. Условием, определяющим его аварийность от превышения допустимого давления пара является нарушение баланса между потребляемым и генерируемым паром.

#### Используемая информация

Для формирования алгоритма регулятора тепловой нагрузки необходимо определять следующие переменные состояния парового тракта котлоагрегата:  $f_b$  — суммарный расход топлива,  $Q$  — тепловосприятие топки,  $D_r$  — количество генерируемого пара,  $D_k$  — количество потребляемого пара,  $P_b$  — давление пара в барабане,  $P_m$  — давление пара в магистрали.

В результате решения задачи — обеспечения безопасной и безаварийной работы парового тракта, определяется управляющее воздействие  $u_y$ , подаваемое на регуляторы сервоприводов заслонки шахтного метана и заслонки природного газа.

Основным условием потребления газа является максимальное использование шахтного метана.

#### Математическое описание

Котельный агрегат как объект регулирования давления или расхода пара упрощенно можно представить в виде двух последовательно соединенных элементов: топки и испарительного устройства котла. Экономайзерный и пароперегревательный участки котла условно принимаются входящими в испарительный контур. Регулируемым параметром может быть расход ге-

нерируемого пара  $D_r$  или давление пара в магистрали  $P_m$ , а регулирующим воздействием — изменение подачи в топку топлива  $f_b$  и необходимого для горения воздуха  $V_D$ . При изменении расхода топлива и воздуха меняется количество тепла  $Q$ , воспринятого котельным агрегатом. Тепловосприятие  $Q$  является промежуточным параметром, характеризующим воздействие топки на испарительное устройство котла.

Рассмотрим упрощенно основные зависимости, определяющие динамические свойства котлоагрегата.

Аккумулирующая способность металла труб испарительного устройства характеризуется следующим уравнением:

$$Q - Q_\omega = m \cdot c_p \cdot \frac{d\Theta_m}{dt}, \quad (1)$$

где  $Q$  — количество тепла, воспринятого трубами;  $Q_\omega$  — количество тепла, воспринятое рабочим телом;  $m$  — вес металла труб поверхностей нагрева;  $c_p$  — удельная теплоемкость металла труб;  $\Theta_m$  — температура стенки труб.

Количество тепла, передаваемое рабочему телу в установившемся состоянии, определяется уравнением:

$$Q_\omega = F_H \cdot \alpha_\omega \cdot (\Theta_m - \Theta_\omega), \quad (2)$$

где  $F_H$  — площадь поверхности соприкосновения среды с металлом труб;  $\alpha_\omega$  — коэффициент теплоотдачи от стенок труб к рабочему телу;  $\Theta_\omega$  — установившаяся температура рабочего тела.

При неизменной температуре рабочего тела  $\Theta_{0\omega}$ , обозначив  $F_H \cdot \alpha_\omega \cdot \Theta_{0\omega} = k$ , уравнение можно преобразовать к виду:

$$Q_\omega = F_H \cdot \alpha_\omega \cdot \Theta_m - k. \quad (3)$$

При малых отклонениях переменных  $Q = Q_0 + \Delta Q$  и  $Q_\omega = Q_{0\omega} + \Delta Q_\omega$  после отбрасывания членов, соответствующих установившемуся заданному режиму, уравнения в приращениях приобретают вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q - \Delta Q_\omega &= m \cdot c_p \cdot \frac{d\Delta\Theta_m}{dt} \\ \Delta Q_\omega &= F_H \cdot \alpha_\omega \cdot \Delta\Theta_m \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Продифференцировав второе уравнение системы уравнений (4) и исключив из этих уравнений  $\frac{d\Delta\Theta_m}{dt}$  получим:

$$\Delta Q = \Delta Q_\omega + \frac{m \cdot c_p}{F_H \cdot \alpha_\omega} \cdot \frac{d\Delta Q_\omega}{dt}. \quad (5)$$

Коэффициент при производной  $\frac{d\Delta Q_\omega}{dt}$  в уравнении имеет размерность времени. Обозначив  $\frac{m \cdot c_p}{F_H \cdot \alpha_\omega} = T_H$ , получим окончательное уравнение, устанавливающее связь между количеством тепла, воспринятого трубами  $\Delta Q$ , и количеством тепла, переданного рабочему телу  $\Delta Q_\omega$ :

$$\Delta Q = \Delta Q_\omega + T_H \cdot \frac{d\Delta Q_\omega}{dt}. \quad (6)$$

Постоянная времени  $T_H$  характеризует аккумулярующую ёмкость металла поверхностей нагрева.

Перейдем к операционной форме записей дифференциальных уравнений элементов системы, которая более проста и удобна для преобразования и решения алгебраических уравнений, чем дифференциальная. Для чего применим преобразования Лапласа.

При этом для нулевых начальных условий, первая производная будет изображением  $px(p)$ , вторая —  $p^2 x(p)$ , третья —  $p^3 x(p)$ . Решив операционное уравнение, мы найдем не оригинал  $x(t)$ , а только его изображение  $x(p)$ . Определить оригинал по изображению можно с помощью таблиц оригиналов и их изображений, для чего в настоящее время существуют специальные калькуляторы.

В операционной форме уравнение 6 преобразуется в передаточную функцию

$$W_n(p) = \frac{1}{T_H \cdot p + 1}. \quad (7)$$

Входной величиной объекта в этом случае является изменение потока тепла  $\Delta Q$ , подведенного к испарительному участку, а выходной — изменение тепла, воспринятого рабочим телом  $\Delta Q_{\omega}$ .

Количество генерируемого пара в котле зависит не только от количества тепла, подведенного к рабочей среде, но также от ряда других условий, важнейшим из которых является изменение давления в испарительной системе. При изменении давления изменяются термодинамические свойства воды и пара. Повышение давления сопровождается увеличением температуры кипения воды и соответственно увеличением теплосодержания, и наоборот. Поэтому с повышением давления происходит аккумуляция тепла в рабочем теле и уменьшение количества генерируемого пара. При падении давления расход пара увеличивается за счет аккумулярованного тепла. Скорость изменения давления пара в барабане при нарушении материального баланса будет пропорциональна разности между воспринятым теплом  $Q$  и теплом  $Q_D$ , ушедшим с паром:

$$k_a \cdot \frac{dP_{\sigma}}{dt} = Q - D_k \cdot (i'' - i_{П.В.}), \quad (8)$$

где  $i''$  — энтальпия насыщенного пара на выходе из барабана котла;  $i_{П.В.}$  — энтальпия питательной воды, поступающей в котёл;  $k_a$  — коэффициент пропорциональности, характеризующий тепловую аккумулярующую способность пароводяной смеси и металла испарительной части котла.

Для сопоставления аккумулярующей способности котельных агрегатов с различной производительностью и различным рабочим давлением коэффициент пропорциональности  $k_a$  относят к номинальному давлению в котле  $P_{0\sigma}$  и к максимальной тепловой производительности  $Q_{\max}$ :

$$\frac{k_a \cdot P_{0\sigma} \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{P_{\sigma} - P_{0\sigma}}{P_{0\sigma}} \right)}{Q_{\max}} = \frac{Q - Q_D}{Q_{\max}}. \quad (9)$$

Введем обозначения:  $x_{\text{вых}} = \frac{P_{\sigma} - P_{0\sigma}}{P_{0\sigma}}$  — относительное изменение давления в барабане;  $x_{\text{вх}} = \frac{Q - Q_D}{Q_{\max}}$  — относительное изменение возмущающего воздействия;  $T_{p,\sigma} = \frac{k_a \cdot P_{0\sigma}}{Q_{\max}}$  — постоянная времени объекта.

Используя эти обозначения, получим уравнение в безразмерной форме:

$$T_{p,\sigma} \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} = x_{\text{вх}}. \quad (10)$$

Постоянная времени объекта  $T_{p,\sigma}$  характеризует время, в течение которого относительное изменение давления достигает величины, равной относительному возмущению, вызвавшему это возмущение давления.

Переходя от оригинала функции к изображению, получим передаточную функцию объекта:

$$W_{p\sigma}(p) = \frac{1}{T_{p\sigma} \cdot p}. \quad (11)$$

Следует отметить, что уравнение (11) справедливо только для частного случая, когда  $\Delta D_k = 0$  то есть когда принудительно поддерживается постоянный расход пара от котла. В практике при изменении давления в котле почти всегда происходит изменение расхода пара, поэтому статические и динамические свойства котла по давлению изменяются и будут иметь вид инерционного звена. Однако объект исследуется без учета этого последнего фактора, т.е. рассматривается случай наименее благоприятных динамических свойств.

Рассмотрим зависимость между генерированием и потреблением пара с учетом влияния потерь давления в котле. При поддержании давления пара у потребителя, давление пара в барабане котла будет изменяться на величину перепада давления, соответствующую нагрузке:

$$\Delta P_{\Pi} = P_{\sigma} - P_M = k_1 \cdot D_k^2 \quad (12)$$

где  $\Delta P_{\Pi}$  — перепад давления на участке пароперегревателя и паропровода между потребителем и барабаном котла;  $P_M$  — давление пара в магистрали;  $D_k$  — расход пара от котла;  $k_1$  — коэффициент пропорциональности.

Уравнение для малых отклонений переменных величин можно представить в виде:

$$(P_{0\sigma} + \Delta P_{\sigma}) - (P_{0M} + \Delta P_M) = k_1 \cdot (D_{0k} + \Delta D_k)^2 \quad (13)$$

или

$$\begin{aligned} (P_{0\sigma} + \Delta P_{\sigma}) - (P_{0M} + \Delta P_M) &= \\ &= k_1 \cdot D_{0k}^2 + 2 \cdot k_1 \cdot D_{0k} \cdot \Delta D_k + k_1 \cdot \Delta D_k^2. \end{aligned} \quad (14)$$

Вычитая из уравнения (10.13) уравнение (10.14) и отбрасывая ввиду малости член  $\Delta D_k^2$ , после дальнейших преобразований в результате получим:

$$T \frac{d\Delta D_k}{dt} + k_2 \frac{d\Delta P_M}{dt} = \Delta D_{\Gamma} - \Delta D_k \quad (15)$$

или

$$k_2 \frac{d\Delta P_M}{dt} = \Delta D_{\Gamma} - \Delta D_k - T \frac{d\Delta D_k}{dt}, \quad (16)$$

где  $k_2 = \frac{T \cdot D_{0k}}{2 \cdot \Delta P_{0\Pi}}$ ;  $T = \frac{2 \cdot k_a \cdot \Delta P_{0\Pi}}{Q_{0D}}$ ;  $\Delta D_{\Gamma}$  — условный генерируемый расход пара, который был бы дополнительно получен, если бы всё воспринятое тепло в приращениях от установившегося состояния было израсходовано на производство пара, а не аккумулировалось в испарительной системе котла;  $\Delta D_k$  — расход пара от котла в приращениях от установившегося состояния;  $Q_{0D}$  — количество тепла, уходящее с паром в установившемся состоянии;  $\Delta P_{0\Pi}$  — перепад давления на участке пароперегревателя и паропровода между потребителем и барабаном котла при заданном установившемся расходе пара.

Коэффициент  $T$  имеет размерность времени и является постоянной времени объекта.

Преобразуя уравнение (16) по Лапласу, можно определить передаточные функции объекта по разным каналам возмущения.

При постоянном расходе пара от котла  $\Delta D_k = 0$  зависимость между изменением тепловосприятия котла и изменением давления в магистрали определяется передаточной функцией:

$$W_a(p) = \frac{1}{\frac{T \cdot D_{0k}}{2 \cdot \Delta P_{0\Pi}} \cdot p}, \quad (17)$$

Обозначив  $\frac{2 \cdot \Delta P_{0\Pi}}{D_{0k}} = k$ , получим:

$$W_a(p) = \frac{k}{T \cdot p}. \quad (18)$$

В случае постоянства тепловосприятия котла и изменения расхода пара от котла передаточная функция объекта будет иметь вид:

$$W_{об}(p) = \frac{T \cdot p + 1}{k_2 \cdot p} = \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_3 \cdot T \cdot p}, \quad (19)$$

где  $\frac{1}{k_3}$  — коэффициент, характеризующий изменение перепада давлений;  $\frac{1}{k_3 \cdot T \cdot p}$  — слагаемое, характеризующее аккумуляцию тепла в котле за счет изменения давления.

Передаточная функция объекта по каналу «тепловосприятие котла — изменение расхода пара» при

постоянном давлении в магистрали  $\Delta P_M = const$  будет иметь вид:

$$W_B(p) = \frac{1}{T \cdot p + 1}, \quad (20)$$

а по каналу «изменение давления в магистрали — изменение расхода пара» при постоянном тепловосприятии котла  $\Delta D_{\Gamma} = 0$ :

$$W_{\Gamma}(p) = \frac{k_2 \cdot p}{T \cdot p + 1} = \frac{k_3 \cdot T \cdot p}{T \cdot p + 1}. \quad (21)$$

Эти уравнения в полной мере характеризуют испарительное устройство котельного агрегата в динамике. Коэффициент  $k_a$  определяется из соотношения:

$$k_a = \alpha_B \cdot V_B + \alpha_{\Pi} \cdot V_{\Pi} + \alpha_M \cdot G_M,$$

где  $V_B$  и  $V_{\Pi}$  — объем соответственно воды и пара, содержащихся в котле;  $G_M$  — вес металла испарительного устройства;  $\alpha_B$ ,  $\alpha_{\Pi}$  и  $\alpha_M$  — коэффициенты, характеризующие соответственно долю воды, пара и металла в общей тепловой аккумулирующей способности котла.

Передаточная функция охваченного обратной связью сервопривода заслонки описывается уравнением (22)

$$W_6(p) = \frac{K_n}{T_n p + 1}, \quad (22)$$

где  $K_n, T_n$  — коэффициент усиления и постоянная времени сервопривода.

В соответствии с вышеприведенными динамическими свойствами топочного и испарительного устройства котельного агрегата, структурная схема парового тракта котлоагрегата будет иметь вид, изображенный на рис. 2.

Передаточная функция

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 \cdot p + 1} \quad (23)$$

характеризует инерционность топки. Количество генерируемого пара  $D_{\Gamma}$  также связано инерционной зависимостью с тепловосприятием топки  $Q$ :

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 \cdot p + 1}. \quad (24)$$

Звено с передаточной функцией

$$W_3(p) = \frac{1}{T_3 \cdot p}, \quad (25)$$

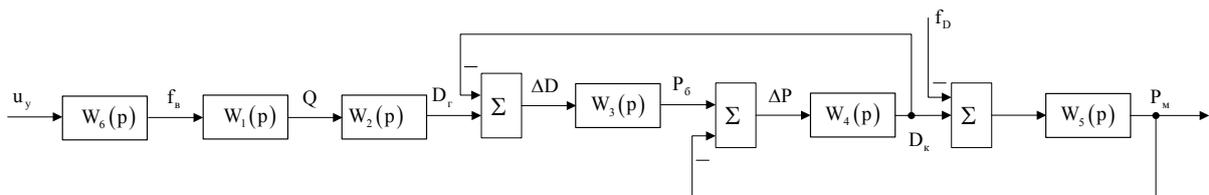


Рис. 2. Структурная схема динамики процессов парового тракта котлоагрегата, как объекта регулирования паровой нагрузки

где  $T_3 = \frac{\Delta D_{0ka}}{d\Delta P_0}$ , характеризует аккумуляцию тепла в

котле, связанную с изменением давления. Падение давления в пароперегревателе и на участке паропровода выражено в виде усилительного звена:

$$W_4(p) = k_4. \quad (26)$$

Аккумуляция тепла в котле характеризуется передаточной функцией:

$$W_5(p) = \frac{Tp + 1}{k_5 Tp} \quad (27)$$

Заменив в передаточных функциях (23, 24, 25, 26, 27) парового тракта котлоагрегата оператор Лапласа ( $p$ ) мнимой комплексной переменной ( $j\omega$ ) получим их комплексные передаточные функции. Это позволит решать задачу аналитического конструирования регулятора, обеспечивающего устойчивое поддержание заданного давления пара в выходной магистрали и параметры переходных процессов, пользуясь простыми, известными методами алгебраических вычислений на комплексной плоскости.

Вышеизложенный алгоритм нами принят за основу для разработки математических моделей тракта питания и газовоздушного тракта утилизационного котлоагрегата.

#### Выводы

1. Разработано схемно структурное решение трикогенерационной станции на базе многотопливного котлоагрегата, который безопасно и энергоэффективно может утилизировать не только природный газ угольных месторождений но и шахтный метан низкой концентрации.

2. На примере парового тракта котлоагрегата показан алгоритм разработки математической модели объекта управления в виде комплексной передаточной функции, позволяющей решать задачу аналитического конструирования регулятора, обеспечивающего устойчивое поддержание заданного давления пара в выходной магистрали и безопасность его эксплуатации, пользуясь простыми, известными методами алгебраических вычислений на комплексной плоскости.

3. Разработанный алгоритм послужит основой для разработки математического обеспечения системы безопасного и энергоэффективного управления многотопливным котлоагрегатом, утилизирующим метан угольной шахты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К.К. Софийский, П.Е. Филимонов, Б.В. Бокий [и др. Динамические способы декольматации поверхностных скважин]. – Д: ТОВ «Східний видавничий дім», 2014. – 248 с.
2. Земляков С.Д. Принципы построения и методы исследования адаптивных САУ. – М.: Наука, 1978. – 113с.
3. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Наука, 1976. – 184с.
4. Бойчук Л.М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. – М.: Энергия, 1971. – 112с.
5. Летов А.М. Математическая теория процессов управления. – М.: Наука, 1981. – 256с.
6. Садовой А.В. Синтез линейных систем оптимального управления на основе принципа симметрии / А.В. Садовой // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика / Харьков: Основа, 1995. с.44–48.
7. Клюев А.С. Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов / А.С.Клюев, А.Т.Лебедев, С.И.Новиков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 280 с.
8. Ротач, В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
9. Kessler, C. Uber die Vorausberechnung optimal abgestimmter Regelkreise. – Regelungstechnik, 1954, № 12, s.274–281.
10. Клюев А.С., Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов / А.С. Клюев А.Г. Товарнов. – М.: Энергия, 1970. – 280 с., ил.
11. Пат.№ 36015 UA, МПК (2006), F 23 N 1/02. Спосіб автоматичного керування, контролю, захисту та сигналізації котлоагрегату / Дубина О.В., Романенко В.И., Садовой О.В., Стасевич Р.К., Тищенко М.Т.; заявник і патентовласник Дубина О.В., Романенко В.И., Садовой О.В., Стасевич Р.К., Тищенко М.Т.-и 200806227; заявл. 12.05.2008; опубл. 10.10.2008, Бюл. №19.
12. Садовой А.В. «Адаптивная автоматизированная система энергоэффективного управления технологическими процессами (АСУ ТП) ТЭЦ-ПВС» / Садовой А.В., Стасевич Р.К., Романенко В.И., Тищенко Н.Т. // Металлургическая и горнорудная промышленность, №3.–Кривой Рог:2009.–С. 52–54.

пост. 30.06.2017