

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 681.5.015.3

DOI: 10.17587/mau.21.575-583

С. Р. Шакиров^{1,2}, канд. физ.-мат. наук, ShakirovSR@ict.nsc.ru,

А. Г. Квашнин³, канд. техн. наук, a.kvashnin@nsu.ru, А. В. Писарев¹, аспирант, pisarev@tecon.ru,

¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск,

²Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск,

³Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск

Разработка и исследование математических моделей элементов газовоздушного тракта для создания АСУ ТП установки по переработке органических отходов

Утилизация органических отходов является крайне важной и актуальной экологической задачей. Одним из перспективных направлений в данной области является создание многорежимных (сжижение, пиролиз и газификация) установок по переработке органических отходов с получением на выходе полезных продуктов в виде непосредственно тепловой энергии и энергоносителей (биоуголь, бионефть, пиролизные смолы, синтез-газ и т.п.) и удобрений. Основными проблемами при создании подобных установок являются нестабильность свойств исходного сырья, его высокая влажность и зольность. Это в свою очередь заставляет применять нестандартное оборудование и нетиповые алгоритмы управления, процесс создания которых требует проведения большой экспериментальной работы. При этом проведение натурных экспериментов является дорогим, сложным и долгим процессом, что приводит к необходимости широкого применения математического и компьютерного моделирования.

В работе получены математические модели элементов газовоздушного тракта (ГВТ) установки по переработке органических отходов. Определены характеристики ГВТ установки как объекта регулирования по давлению в нижней и разрежению в верхней части камеры сжижения.

ГВТ установки, состоящий из дымохода и воздуховода, выполняет функции удаления из камеры сжижания дымовых газов и подачи воздуха, необходимого для поддержания процесса горения топлива. При разработке новых систем автоматизации моделирование позволяет достаточно точно оценить применяемые решения, упростить и удешевить процесс их создания, решить вопросы устойчивости систем, оптимизации переходных процессов и пр. При моделировании газовоздушный тракт установки условно разбит на ряд участков, для которых получены математические модели. Определены нелинейность полученных математических моделей по каналам "давление среды на входе n-го участка ГВТ – давление среды на выходе n-го участка ГВТ", нестационарность объектов регулирования и зависимость их динамических характеристик от режима работы установки. По разработанным моделям выявлена двухсторонняя взаимосвязь газового и воздушного трактов.

Полученные математические модели участков ГВТ установки необходимы для синтеза всережимных регуляторов разрежения дымовых газов в верхней части и давления воздуха в нижней части камеры сжижения установки и расчета компенсаторов межканальных связей газового и воздушного трактов.

Ключевые слова: математическое моделирование, динамические характеристики объекта регулирования, автоматическое регулирование, АСУ ТП, газовоздушный тракт, установка переработки отходов

Введение

В Федеральном исследовательском центре информационных и вычислительных технологий ведутся работы по созданию АСУ ТП опытно-промышленного образца установки по переработке органических отходов [1–4]. Нередко сырье для возобновляемой энергетики, в частности биомасса, обладает существенной нестабильностью свойств [5, 6]. Также в качестве топлива могут использоваться "сложные" виды отходов — высоковлажные и высокозоль-

ные [5]. Это требует использования нетиповых оборудования и алгоритмов управления.

Для новых технологий, оборудование которых находится в стадии разработки и освоения и нет достаточного объема экспериментальных данных о протекании технологических процессов, приходится применять теоретические методы для определения характеристик этих процессов [7].

Ранее в работе [7] были представлены результаты разработки математических моделей газовоздушного тракта (ГВТ) установки по

переработке отходов. Математические модели были рассмотрены укрупненно для воздушного и газового трактов. В настоящей работе определены математические модели элементов воздушного и газового трактов установки и представлен числовой пример расчета.

Обзор математических моделей газовоздушных трактов теплогенерирующих установок

В настоящее время известны математические модели ГВТ из области теплоэнергетики. Ниже представлен анализ математических моделей, описанных в работах [8–12]. Математические модели в них построены на основании закона сохранения масс.

В монографиях [8, 9] рассмотрен регулируемый участок, в котором задан расход на притоке, а давление в определенной точке поддерживается путем воздействия на сток. Потоки воздуха и топливного газа попадают через горелки в топку котла, где происходят процессы окисления топлива. Затем из топки через газоходы дымовые газы поступают в дымосос, который выбрасывает их в окружающую среду.

В работе [10] математическая модель используется в целях выявления причин пульсаций разрежения в топке котла. В качестве регулируемых величин рассматриваются расход воздуха, расход газа и разрежение в топке, а в качестве управляющих величин принимаются скорость вращения двигателя дутьевого вентилятора и дымососа. Представлены переходные характеристики по расходу воздуха, дымовых газов и разрежения в топке котла. В статье [11], как и в работах [8–10], разработаны математические модели газохода и воздуховода ГВТ котла. В качестве регулируемых величин принимаются: разрежение дымовых газов в верхней части топочной камеры (разрежение в топке) и избыток воздуха (его определяют по содержанию кислорода в дымовых газах), который характеризует экономичность процесса горения. Полученная в работе [11] многорежимная дифференциальная модель ГВТ котла линеаризована в окрестностях возможных режимов функционирования. В качестве управляющих воздействий принимаются изменения положений направляющих аппаратов дымососа и дутьевого вентилятора в целях изменения массового расхода дымовых газов и воздуха соответственно.

В работе [12] математическая модель ГВТ котла приведена для однофазных и двухфазных участков как совокупность взаимодействия статических, параметрических и динамических моделей, которая состоит из уравнений материального баланса.

Анализ математических моделей [8–12] показал, что при аналитическом описании технологических процессов используются уравнения баланса массы и тепла. Модели описываются в дифференциальной форме.

- В работах [8, 9] принимаются допущения, что:
- в одном объеме сосредоточена аккумулирующая емкость всех элементов ГВТ;
 - в одной точке сосредоточена дросселирующая способность ГВТ;
 - газоход после дымососа очень короткий (т.е. объем дымовых газов в топке во много раз больше, чем в дымоходе), и влияние изменения давления в топке котла на расход дымовых газов пренебрежимо мало;
 - изменение расхода среды на притоке рассмотрено в качестве внешнего возмущения, и влияние на его величину давления в топке котла не рассматривается.

В работе [10] математическая модель содержит принципиальное допущение, что инерционность электропривода пренебрежимо мала по отношению к инерционностям аэродинамических процессов и линейности зависимостей давления и разрежения от частот вращения тягодутьевых механизмов.

В статье [11] используются допущения, указанные в работах [8, 9], кроме того считается, что воздуховод малой длины (объем дымовых газов в топке во много раз больше объема воздуха в воздуховоде) расположен за дутьевым вентилятором.

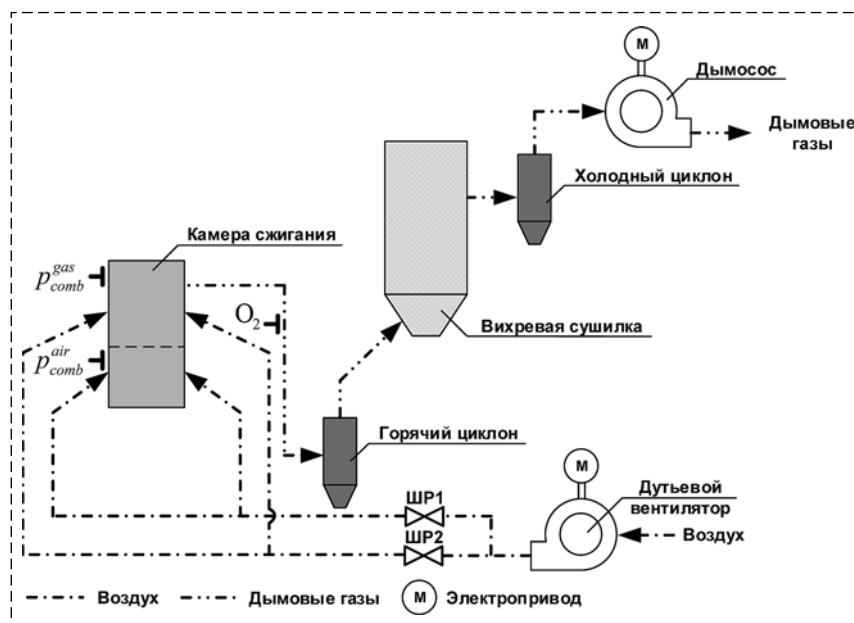
В работе [12] при составлении уравнений динамики технологических параметров ГВТ применяется метод линеаризации, позволяющий использовать при исследованиях малые отклонения от стационарного режима. Массовая аккумуляция в газовоздушном тракте не учитывается. Давление дымовых газов принято постоянным.

В настоящей работе при разработке математической модели ГВТ установки допущения, приведенные в работах [8–12], не используются. Поскольку инерционности электроприводов и аэродинамических процессов соизмеримы, то учтены инерционности частотно-регулируемых преобразователей (ЧРП) электроприводов (динамические характеристики для аналогичных

ЧРП определены в работе [13]) и квадратичные зависимости [14] давления (разрежения) на напоре (всасе) дутьевого вентилятора (дымососа) установки. Так же, как и в работах [8–10], в качестве управляющих величин принимаются скорость вращения двигателя дутьевого вентилятора и дымососа. Поскольку объемы камеры сжигания, воздуховодов и газоходов установки соизмеримы, то потери давления от скорости воздушного (газового) потока определяются квадратичными зависимостями индивидуально для каждого участка ГВТ установки, и учитывается взаимное влияние газового и воздушного трактов. При разработке математической модели ГВТ установки в качестве регулируемых величин принимаются давление в нижней и разрежение в верхней части камеры сжигания, т.к. они являются контролируемыми технологическими параметрами. Это позволяет более детально учсть факторы, влияющие на работу ГВТ установки на этапах синтеза корректирующих устройств систем автоматического регулирования технологических параметров, проектирования и внедрения АСУ ТП.

Математическая модель газовоздушного тракта установки

Газовый тракт установки, изображенный на рис. 1, служит для удаления дымовых газов, образовавшихся в процессе окисления топли-



Структурная схема газовоздушного тракта установки (ШР1, ШР2 – шибера регулирующие)

Flow chart of the gas-air path of the organic waste processing plant

ва в камере сжигания. Воздушный тракт установки необходим для подачи воздуха в камеру сжигания установки. К оборудованию газового и воздушного трактов относятся воздуховоды, газоходы, камера сгорания, сушилка. Движение воздуха и газов происходит вследствие перепада давлений, которое создается тягодутьевыми механизмами (ТДМ): вентилятором и дымососом. Дутьевой вентилятор (ДВ) нагнетает воздух и создает избыточное давление. Дымосос (ДС) удаляет уходящие газы, создавая разрежение.

Для управления тягодутьевым режимом установки необходимо стабилизировать два технологических параметра: давление p_{comb}^{air} в нижней и разрежение p_{comb}^{gas} в верхней части камеры сжигания. Содержание кислорода O_2 в дымовых газах характеризует избыток воздуха в процессе горения топлива.

Рассмотрим все участки ГВТ в виде емкостей, способных аккумулировать среду (воздух, дымовые газы). К емкости n подводится поток $Q_{entr,n}$ и отводится поток $Q_{exit,n}$, объем емкости равен V_n , m_n – количество аккумулированной среды для n -го участка ГВТ.

В процессе работы величины $Q_{entr,n}$, $Q_{exit,n}$, m_n получают малые приращения относительно своих рабочих значений $Q_{entr,n}^{work}$, $Q_{exit,n}^{work}$, m_n^{work} , которые соответствуют режиму работы установки с номинальной производительностью: $\Delta Q_{entr,n} = Q_{entr,n} - Q_{entr,n}^{work}$, $\Delta Q_{exit,n} = Q_{exit,n} - Q_{exit,n}^{work}$, $\Delta m_n = m_n - m_n^{work}$.

Изменения отводимого потока не являются произвольными и зависят от изменения количества аккумулированной среды:

$$\Delta Q_{exit,n} = k_{m,n} \Delta m_n. \quad (1)$$

где $k_{m,n}$ – коэффициент пропорциональности n -го участка ГВТ; m_n [кг] – количество аккумулированной среды для n -го участка ГВТ.

Чем больше (или меньше) приращение аккумулированной среды, тем больше (или меньше) ответные приращения отводимого потока, т.е. емкость обладает эффектом линейного самовыравнивания [15].

Приращения $\Delta Q_{entr,n}$, $\Delta Q_{exit,n}$, Δm_n , как и абсолютные значения величин, связаны уравнением материального баланса [15] (закон сохранения масс):

$$\frac{d\Delta m_n}{dt} = \rho_{entr.n}\Delta Q_{entr.n} - \rho_{exit.n}\Delta Q_{exit.n}, \quad (2)$$

где $\rho_{entr.n}$ [кг/м³] — плотность среды на входе n -го участка ГВТ; $\rho_{exit.n}$ [кг/м³] — плотность среды на выходе n -го участка ГВТ.

Далее в расчетах вместо $\rho_{entr.n}$, $\rho_{exit.n}$ используется плотность потока среды n -го участка ГВТ ρ_n . Методы определения ρ_n различны для разных участков ГВТ:

- для камеры сжигания ρ_n принимается равной плотности дымовых газов [8, 16];
- для воздуховодов, газоходов и сушилки ρ_n определяется по средней температуре среды на входе и выходе участка ГВТ [16].

Выразим в уравнении (1) величину Δm_n и подставим в уравнение (2):

$$\frac{1}{\rho_n k_{m.n}} \frac{d\Delta Q_{exit.n}}{dt} = \Delta Q_{entr.n} - \Delta Q_{exit.n}, \quad (3)$$

где $\frac{1}{\rho_n k_{m.n}} = T_n$ [с] — постоянная времени объекта регулирования (n -го участка ГВТ), описываемого дифференциальным уравнением (3).

Соотношение (3) справедливо не только для приращений, но и для абсолютных значений величин [15]. Выразив из формулы (1) коэффициент $k_{m.n}$, получим

$$T_n = \frac{1}{\rho_n k_{m.n}} = \frac{m_n}{\rho_n Q_{exit.n}}. \quad (4)$$

Заменим m_n в формуле (4):

$$m_n = \rho_n V_n. \quad (5)$$

Тогда с учетом выражения (5) постоянная времени n -го участка ГВТ T_n будет определяться по формуле

$$T_n = \frac{V_n}{Q_{exit.n}}. \quad (6)$$

Передаточная функция объекта регулирования по каналу "расход (давление) среды на входе участка ГВТ — расход (давление) среды на выходе участка ГВТ" с учетом уравнения (3) будет иметь вид

$$W_n(s) = \frac{k_n}{T_n s + 1}, \quad (7)$$

где s — оператор Лапласа; k_n — коэффициент усиления передаточной функции n -го участка ГВТ.

Коэффициент усиления k_n передаточной функции (7) по каналу "расход среды на входе

участка ГВТ — расход среды на выходе участка ГВТ" определяется по формуле

$$k_n^Q = \frac{\Delta Q_{exit.n}}{\Delta Q_{entr.n}}, \quad (8)$$

где $\Delta Q_{entr.n}$ [м³/с] — изменение расхода среды на входе участка ГВТ; $\Delta Q_{exit.n}$ [м³/с] — изменение расхода среды на выходе участка ГВТ.

Поскольку в установившихся режимах работы установки $\Delta Q_{exit.n} = \Delta Q_{entr.n}$, то по формуле (8) $k_n^Q = 1$.

Коэффициент усиления для передаточной функции (7) по каналу "давление среды на входе участка ГВТ — давление среды на выходе участка ГВТ" будет зависеть от аэродинамического сопротивления [17] n -го участка ГВТ и определяться по формуле

$$k_n^P = \frac{\Delta p_{exit.n}}{\Delta p_{entr.n}}, \quad (9)$$

где $\Delta p_{entr.n}$ [Па] — изменение давления среды на входе n -го участка ГВТ; $\Delta p_{exit.n}$ [Па] — изменение давления среды на выходе n -го участка ГВТ.

В формуле (9) $\Delta p_{exit.n} = \Delta p_{entr.n} - \Delta p_{resist.n}$, следовательно

$$k_n^P = 1 - \frac{\Delta p_{resist.n}}{\Delta p_{entr.n}}, \quad (10)$$

где $\Delta p_{resist.n}$ [Па] — изменение аэродинамического сопротивления n -го участка ГВТ.

В статическом режиме работы установки уравнения материального баланса ГВТ имеют вид

$$p_{comb}^{air} = p_{fan}^{air} - p_{resist}^{air} + p_{comb}^{gas}; \quad (11)$$

$$p_{exh} = -p_{comb}^{gas} + p_{resist.1}^{gas} + p_{resist.2}^{gas} + \Delta p_{dryer} + p_{comb}^{air}, \quad (12)$$

где $p_{resist.1}^{gas}$ [Па] — аэродинамическое сопротивление 1-го участка газохода от камеры сжигания до сушилки; $p_{resist.2}^{gas}$ [Па] — аэродинамическое сопротивление 2-го участка газохода от сушилки до ДС; Δp_{dryer} [Па] — аэродинамическое сопротивление сушилки; p_{resist}^{air} [Па] — аэродинамическое сопротивление участка воздуховода ДВ—камера сжигания; $p_{fan(exh)}^{air}$ [Па] — давление (разрежение) на напоре (всасе) ДВ (ДС).

Анализ формул (11), (12) позволяет определить двухстороннюю взаимосвязь газового и воздушного трактов [10, 18], так как в формуле (11), описывающей баланс давлений воздушного тракта установки, содержится величина p_{comb}^{gas} , а в уравнении (12), являющемся балансом давлений газового тракта, — величина p_{comb}^{air} .

В выражениях (11), (12) величина $p_m < 0$.

Величина p_{resist}^{air} в выражениях (10), (11) определяется по формуле [10]

$$p_{resist}^{air} = k_{resist}^{air} Q_{entr}^2, \quad (13)$$

где k_{resist}^{air} — коэффициент аэродинамического сопротивления воздушного тракта ГВТ.

Величина $p_{resist,n}$ в выражениях (10), (12) определяется по формуле [10]

$$p_{resist,n}^{gas} = k_{resist,n}^{gas} Q_{entr,n}^2, \quad (14)$$

где $k_{resist,n}^{gas}$ — коэффициент аэродинамического сопротивления n -го участка газового тракта ГВТ.

Величина Δp_{dryer} в выражениях (10), (12) определяется по формуле [10]

$$\Delta p_{dryer} = k_{dryer} Q_{entr,n}^2, \quad (15)$$

где k_{dryer} — коэффициент аэродинамического сопротивления сушилки.

Коэффициенты k_{resist}^{air} для воздуховода и $k_{resist,n}^{gas}$ для газоходов определяются по формуле Дарси—Вейсбаха [14, 19], для сушилки коэффициент p_{dryer} определяется по соотношениям, приведенным в работе [20].

Величины p_{fan} и p_{exh} в выражениях (11) и (12) определяются по формуле [14]:

$$p_{fan(exh)} = k_{fan(exh)}^p \omega_{fan(exh)}^2, \quad (16)$$

где $k_{fan(exh)}^p$ — коэффициент взаимосвязи параметров ДВ (ДС) по каналу "частота вращения — давление (разрежение) на стороне нагнетания (всаса)"; $\omega_{fan(exh)}$ [с^{-1}] — частота вращения ДВ (ДС).

По формулам (13)–(16) определена нелинейность математической модели по каналу "давление среды на входе участка ГВТ—давление среды на выходе участка ГВТ". Из формул (13)–(16) следует, что величины p_{resist}^{air} , $p_{resist,n}^{gas}$, Δp_{dryer}

связаны квадратичной зависимостью с величиной $Q_{entr,n}$, а $p_{fan(exh)}$ — с величиной $\omega_{fan(exh)}$.

В формуле (3) заменим $\Delta Q_{entr,n}$ на величину $Q_{fan(exh)}$, которая определяется по уравнению [14]

$$Q_{fan(exh)} = k_{fan(exh)}^Q \omega_{fan(exh)}, \quad (17)$$

где $Q_{fan(exh)}$, $\text{м}^3/\text{с}$ — расход воздуха (дымовых газов) через ДВ (ДС); $k_{fan(exh)}^Q$ — коэффициент взаимосвязи параметров ДВ (ДС) по каналу "частота вращения—расход воздуха (дымовых газов)".

Перейдя к абсолютным величинам, получим передаточную функцию (7), которая будет описывать объект регулирования по каналу "частота вращения ДВ (ДС)—расход среды на выходе участка воздушного (газового тракта)".

В формуле (10) при использовании вместо $p_{entr,n}$ уравнения (16) передаточная функция (7) будет описывать объект регулирования по каналу "частота вращения ДВ (ДС)—давление среды на выходе участка воздушного (газового тракта)".

Расчет динамических характеристик ГВТ установки

Конструктивные характеристики элементов ГВТ установки, необходимые для расчетов динамических характеристик, приведены в табл. 1 (в табл. 1 и далее в табл. 3, 6 используются следующие обозначения: КС — камера сжигания, суш — сушилка).

В формулах (16), (17) для определения коэффициентов k_{fan}^p , k_{exh}^p , k_{fan}^Q , k_{exh}^Q использовались конструктивные характеристики ДВ и ДС. На основании конструктивных характеристик ДВ [21] и ДС [22] составлена табл. 2.

В табл. 2 используются следующие обозначения: $Q_{fan(exh)}^{\max}$ [$\text{м}^3/\text{с}$] — максимальная производительность ДВ (ДС); $p_{fan(exh)}^{\max}$ [Па] — макси-

Таблица 1
Table 1

Конструктивные и технологические характеристики участков ГВТ в рабочем режиме установки

Design and technological characteristics of sections of the gas-air flow path sections in the operating mode of the plant

Участок ГВТ	Длина l_n , м	Диаметр d_n , м	Площадь сечения S_n , м^2	Объем V_n , м^3	Температура среды t_n , $^\circ\text{C}$	Плотность среды ρ_n , $\text{кг}/\text{м}^3$
ДВ—КС	11	0,3	0,0707	0,78	20	1,2
КС	1,3 (высота)	0,15 (низ), 0,78 (верх)	0,465 (эквивал. радиус)	1	850	0,23
КС—суш	10	0,3	0,0707	0,7	850	0,23
Суш	1,5 (высота)	0,8	0,5	0,75	500 (средняя)	0,45
Суш—ДС	2	0,3	0,0707	0,14	150	0,83

Таблица 2
Table 2

Конструктивные характеристики ТДМ

Structural specifications of mechanisms of the gas-air flow path

ТДМ	$Q_{fan(exh)}^{\max}$, $\text{м}^3/\text{с}$	$p_{fan(exh)}^{\max}$, Па	$k_{fan(exh)}^p$	$k_{fan(exh)}^Q$	$\omega_{fan(exh)}^{\max}$, с^{-1}
ДВ	0,64	2900	0,03	0,002	314
ДС	0,61	2100	0,021	0,0019	314

мальное давление (разрежение) на напоре ДВ (ДС); $\omega_{fan(exh)}^{\max}$ [с^{-1}] — максимальная частота вращения ДВ (ДС).

Минимальная производительность ДВ и ДС определяется условиями управления установки в пусковых режимах [1]. В пусковом режиме установки начальная частота вращения электродвигателя ДС ω_{exh}^{start} должна составлять $62,8 \text{ с}^{-1}$ [1]. Следовательно, производительность ДВ Q_{fan}^{start} должна равняться производительности ДС при пуске Q_{exh}^{start} . Поскольку в пусковых

режимах установки средой, протекающей в газоходах, камере сжигания и вихревой сушилке, является воздух, то его плотность одинакова по всему ГВТ и равна $1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ при 20°C .

Аэродинамические характеристики ГВТ, значения основных технологических параметров установки в пусковом и рабочем режимах, технологические параметры ТДМ, необходимые для определения коэффициентов передаточной функции (7), приведены в табл. 3—5.

По формулам (6), (10) и данным, приведенным в табл. 3—5, определены параметры передаточной функции (7) для участков ГВТ (табл. 6).

Из анализа данных, приведенных в табл. 6, и формулы (6) определена зависимость T_n от $Q_{exit,n}$, т.е. режима работы установки. Значение плотности ρ_n для участков газового тракта установки в процессе работы может неконтролируемо изменяться из-за различных факторов (элементного состава топлива, влажности топлива после сушки и температур дымовых

газов [3]) и определяется по зависимостям, приведенным в работах [23, 24]. От ρ_n зависит $p_{resist,n}$ [19, 20]

и соответственно коэффициент k_n^p (определяется по формуле (10)). Это и определяет нестационарность коэффициентов усиления и постоянных времени математических моделей объектов регулирования.

По формулам (7), (10) и данным, приведенным в табл. 6, для воздушного тракта установки по каналу "давление на входе—давление на выходе воздушного тракта установки" можно получить следующий вид передаточной функции:

$$W_{air}(s) = \frac{p_{comb}^{air}}{p_{fan}} = \frac{k_{air}}{(T_{air}s + 1)}, \quad (18)$$

где k_{air} — коэффициент усиления передаточной функции (18); T_{air} [с] — постоянная времени передаточной функции (18).

Значение T_{air} для передаточной функции (18) изменяется в диапазоне от $T_{air}^{start} = 7,3$ с для пускового режима работы установки до $T_{air}^{work} = 1,5$ с — для рабочего режима установки. Значение k_{air} для передаточной функции (18) изменяется в диапазоне $0,95 = k_{air}^{start} \leq k_{air} \leq k_{air}^{work} = 0,96$.

Аэродинамические характеристики ГВТ
The aerodynamic characteristics of the the gas-air flow path

Участок ГВТ	Пусковой режим установки			Рабочий режим установки		
	Ско- рость среды v_n , м/с	Коэф- фициент сопро- тивления $k_{resist,n}$	Сопро- тив- ление $p_{resist,n}$, Па	Ско- рость среды v_n , м/с	Коэф- фициент сопро- тивления $k_{resist,n}$	Сопро- тив- ление $p_{resist,n}$, Па
ДВ—КС	1,85	264,8	3,9	7,9	264,8	71,4
КС—суш	1,85	240	3,6	34,7	46,3	16,5
Суш	0,26	13,4	0,2	3,36	5,6	2
Суш—ДС	1,85	48	0,72	13	33,4	11,9

Таблица 4
Table 4

Значения основных технологических параметров установки

Values of the main technological parameters of the plant

Технологический параметр	p_{comb}^{air} , Па	p_{comb}^{gas} , Па
Пусковой режим установки	77,5	-2
Рабочий режим установки	1837	-2

Таблица 5
Table 5

Технологические параметры ТДМ

Technological parameters of mechanisms of the gas-air flow path

ТДМ	Пусковой режим установки			Рабочий режим установки		
	$\omega_{fan(exh)}^{start}$, с^{-1}	$Q_{fan(exh)}^{start}$, $\text{м}^3/\text{с}$	$p_{fan(exh)}^{start}$, Па	$\omega_{fan(exh)}^{start}$, с^{-1}	$Q_{fan(exh)}^{start}$, $\text{м}^3/\text{с}$	$p_{fan(exh)}^{start}$, Па
ДВ	52,6	0,107	81,4	255	0,519	1909
ДС	62,8	0,122	-84	296,3	0,576	-1869

Таблица 6
Table 6

Параметры передаточных функций участков ГВТ по каналам “расход (давление) среды на входе участка ГВТ—расход (давление) среды на выходе участка ГВТ”

Parameters of transfer functions of sections of the gas-air flow path on the «flow (pressure) of the substance at the inlet of the gas-air flow path section — flow (pressure) of the substance at the outlet of the gas-air flow path section» channels

Участок ГВТ	<i>n</i>	Пусковой режим установки		Рабочий режим установки	
		Постоянная времени, <i>T_n</i> , с	Коэффициент усиления		Постоянная времени, <i>T_n</i> , с
			<i>k_n^Q</i>	<i>k_n^P</i>	
ДВ—КС	—	7,3	1	0,95	1,5
КС—суш	1	5,7	1	0,95	1,2
Суш	2	6,1	1	0,99	1,3
Суш—ДС	3	1,1	1	0,99	0,24

В соответствии с формулами (7), (10) и данными, приведенными в табл. 6, для газового тракта установки по каналу "разрежение на входе—разрежение на выходе газового тракта установки" передаточная функция будет иметь вид

$$W_{gas}(s) = \frac{p_{comb}^{gas}}{p_{exh}} = \frac{-k_{gas,1}k_{gas,2}k_{gas,3}}{(T_{gas,1}s + 1)(T_{gas,2}s + 1)(T_{gas,3}s + 1)}, \quad (19)$$

где $k_{gas,1}$, $T_{gas,1}$ [с] — коэффициент усиления, постоянная времени 1-го участка газового тракта установки (камера сжигания—сушилка); $k_{gas,2}$, $T_{gas,2}$ [с] — коэффициент усиления, постоянная времени 2-го участка газового тракта установки (сушилка); $k_{gas,3}$, $T_{gas,3}$ [с] — коэффициент усиления, постоянная времени 3-го участка газового тракта установки (сушилка—ДС).

Значения $T_{gas,1}$, $T_{gas,2}$, $T_{gas,3}$ и произведение $k_{gas,1}k_{gas,2}k_{gas,3}$ для передаточной функции (19) изменяются в диапазонах:

$$5,7 = T_{gas,1}^{start} \leqslant T_{gas,1} \leqslant T_{gas,1}^{work} = 1,2 \text{ с};$$

$$6,1 = T_{gas,2}^{start} \leqslant T_{gas,2} \leqslant T_{gas,2}^{work} = 1,3 \text{ с};$$

$$1,1 = T_{gas,3}^{start} \leqslant T_{gas,3} \leqslant T_{gas,3}^{work} = 0,24 \text{ с};$$

$$0,93 \leqslant k_{gas,1}k_{gas,2}k_{gas,3} \leqslant 0,97.$$

Передаточные функции объектов регулирования (18) и (19) определены для случая, когда воздушный и газовый тракты установки рассматриваются отдельно.

Полученные передаточные функции (18) и (19) необходимы для синтеза всережимных регуляторов ГВТ установки.

Заключение

1. Получены математические модели элементов ГВТ установки по переработке органических отходов, необходимые для синтеза регуляторов разрежения дымовых газов в верхней части и давления воздуха в нижней части камеры сжигания.

2. Полученные в настоящей работе математические модели позволяют определить двухстороннюю взаимосвязь газового и воздушного трактов.

3. Установлена нелинейность математических моделей по каналам "давление среды на входе *n*-го участка ГВТ—давление среды на выходе *n*-го участка газовоздушного тракта".

4. Установлена нестационарность объектов регулирования и зависимость их динамических характеристик от режима работы установки.

5. С помощью разработанных математических моделей показана работоспособность оборудования ГВТ установки при выбранных конструктивных решениях (характеристиках) для заданных режимов работы, что позволит в дальнейшем существенно сократить объем выполняемых экспериментальных работ на опытно-промышленной установке.

Список литературы

1. Гаркуша В. В., Квашнин А. Г., Мишинев А. С., Писарев А. В., Сафонов А. В., Шакиров С. Р., Яковлев В. В. Контроль и корректировка работы автоматизированной системы управления технологическими процессами во время высокотемпературных испытаний. Анализ результатов высокотемпературных испытаний. Доработка автоматизированной системы управления технологическими процессами по результатам испытаний // Отчет о выполнении НИОКР. Рег. номер НИОКР: 115120210006. Регистрационный номер ИКБРС: АААА-Б16-216082340009-3. Дата регистрации 23.08.2016. — 60 с. URL: <https://rosrid.ru/iKrbis/downloadFullText/OA5QAF74AH-CFDCNPIONYNETE> (дата обращения: 30.10.2019).

2. Шакиров С. Р., Квашнин А. Г., Писарев А. В. Моделирование работы аддитивной системы управления процессом сушки в установке утилизации органических отходов // Автометрия. 2018. № 5. С. 122–128.

3. Шакиров С. Р., Квашнин А. Г., Писарев А. В. Синтез нейро-нечеткого регулятора тепловой нагрузки установки переработки органических отходов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 9. С. 54–62.

4. Вильчек С. Ю., Гаркуша В. В., Квашнин А. Г., Мишнев А. С., Сторожев Ф. Н., Яковлев В. В. Компоненты автоматизированной системы управления процессами переработки биомассы в тепло и энергоносители во вращающемся термохимическом ректоре // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18. Специальный выпуск: Труды Всероссийской конференции "Индустриальные информационные системы — 2013". С. 139—143.
5. Вильчек С. Ю., Квашнин А. Г., Сафонов А. В., Сторожев Ф. Н. Проблемы создания адаптивной системы управления энергетическим комплексом по переработке углеродо-содержащих отходов // "Индустриальные информационные системы" — ИИС-2015. Всеросс. Конф. с междунар. участием: Сборник тезисов докладов. Новосибирск, КТИ ВТ СО РАН, 2015. С. 15—16.
6. Basu Prabir. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. 2nd Edition. UK: Elsevier Inc., 2013. 530 p.
7. Шакиров С. Р., Квашнин А. Г., Писарев А. В. Разработка математической модели газовоздушного тракта установки утилизации органических отходов // Сб. науч. тр. X всеросс. Конф. "Наука. Технологии. Инновации", Новосибирск, 05—09 декабря 2016 г. Часть 1. С. 46—48.
8. Профос П. Регулирование паросиловых установок. М.: Энергия, 1967. 368 с.
9. Демченко В. А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. Одесса: Астрапринт, 2001. 302 с.
10. Пономарев А. А. Разработка и исследование модернизированного многоканального ПД-регулятора для стабилизации режимов работы теплоэнергетического котла: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. Новосибирск. 2013. 122 с.
11. Ложечников В. Ф., Михайленко В. С., Максименко И. Н. Аналитическая многорежимная математическая модель динамики газовоздушного тракта барабанного котла средней мощности // ААЭКС (Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы). Моделирование объектов и систем управления. 2007. № 2(20). С. 29—33.
12. Беднаржевский В. С. Параметрическое моделирование узлов паровых котлов // Известия вузов. Машиностроение. 2002. № 4. С. 65—69.
13. Шакиров С. Р., Квашнин А. Г., Писарев А. В. Моделирование автоматической системы управления непрерывным дозированием сыпучих материалов // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. 2018. Т. 1, № 3-1. С. 77—90.
14. Ganapathy V. Steam Generators and Waste Heat Boilers: For Process and Plant Engineers. NY: CRC Press, 2014. 540 p.
15. Тихонов О. Н. Решение задач по автоматизации процессов обогащения и металлургии. Л.: Недра, 1969. 432 с.
16. Круглов В. И., Петражицкий Г. Б. Задачник по технической термодинамике и теории тепломасообмена. М.: Выш. шк. 2011. 384 с.
17. Brian Elmegaard. Simulation of boiler dynamics — Development, Evaluation and Application of a General Energy System Simulation Tool. Technical University of Denmark, Department of Energy Engineering. Ph.D. Thesis: Report Number ET—PhD 99—02. 1999. 302 p.
18. Головенкин А. Н., Бельтиюзов А. Г. Динамическая модель газовоздушного тракта парового котла как объекта регулирования // Всеросс. ежегодная научно-техническая конференция "общество, наука, инновации" (HTK-2012). Киров, ВятГУ, 2012. С. 1143—1146.
19. Barber A. Pneumatic Handbook, 8th edition. UK: Elsevier Science & Technology Books, 1997. 659 p.
20. Лебедев В. В. Сушка зернистых материалов в аппарате с модифицированным вихревым слоем: Дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Тверь. 2007. 121 с.
21. URL: [http://ventclima.biz/f/vr_240-26_\(vr_12-26\).pdf](http://ventclima.biz/f/vr_240-26_(vr_12-26).pdf) (дата обращения: 30.10.2019).
22. URL: <http://tehnorostmash.ru/images/v92-tyagodut-mashiny-VD-i-D.pdf> (дата обращения: 30.10.2019).
23. Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, Mehmet Kanoglu. Thermodynamics An Engineering Approach. 8th Edition. NY: McGraw-Hill Companies, Inc., 2019. 1009 p.
24. Безгрешнов А. Н., Липов Ю. М., Шлейфер Б. М. Расчет паровых котлов в примерах и задачах: Учеб. Пособ. для вузов. М.: АльянС, 2018. 240 с.

Research and Development of Mathematical Models of Elements of a Gas-Air Flow for Improvement of Automatic Control System of Organic Waste Processing Plant

S. R. Shakirov^{1,2}, ShakirovSR@ict.nsc.ru, A. G. Kvashnin³, a.kvashnin@nsu.ru,

A. V. Pisarev¹, pisarev@tecon.ru,

¹Federal Research Center for Information and Computational Technologies,

Novosibirsk, 630090, Russian Federation,

²Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, 630073, Russian Federation,

³Novosibirsk State University (Russia, Novosibirsk) (NSU), Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Corresponding author: Pisarev A. V., Postgraduate, Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, e-mail: pisarev@tecon.ru

Accepted on April 23, 2020

Abstract

Recycling of organic wastes is an extremely important and challenging environmental task. One of the promising trends in this field is the creation of multi-mode (combustion, pyrolysis and gasification) plants for processing organic wastes with production of such useful products as thermal energy and energy carriers (biocoal, bio-oil, pyrolysis resins, synthesis gas, etc.) and fertilizers. When creating such plants, the main problems include instability of the properties of a source material, its high water and ash content. This drives the developers to use non-standard equipment and atypical control algorithms, the creating of which requires a lot of experimental work to be done. At the same time, conducting field experiments is an expensive, difficult and long process

that highlights the need for extensive use of mathematical and computer modeling. In this paper, mathematical models of elements of the gas-air path of the organic waste processing plant are obtained. The characteristics of the gas-air path of the plant as of an object of regulation for pressure in the lower and vacuum in the upper part of the combustion chamber are determined. The gas-air flow consists of the flue and the air ducts and serves to remove flue gases from the combustion chamber and supply air needed to maintain fuel combustion. When developing new automation systems, modeling allows assessing the applied solutions accurately, simplifying and reducing the cost of their development, solving the problems of system stability, optimizing transient processes, etc. The nonlinearity of the obtained mathematical models on the "the pressure at the inlet to the n-th section air-gas flow path — the pressure at the outlet of the n-th section of the air-gas flow path" channels, the nonstationarity of objects of control and dependence of their dynamic characteristics on operating mode of the plant are determined. Due to developed models, the two-way relationship of the gas and air paths has been revealed. When modeling, the gas-air flow of the plant is divided into several sections for which the mathematical models are obtained. They are required to synthesize controllers of flue gases vacuum in the upper part and the air pressure in the lower part of the combustion chamber.

Keywords: mathematical modeling, dynamic characteristics of the object of regulation, automatic control, process control system, gas-air flow path, organic waste converting plant

For citation:

Shakirov S. R., Kvashnin A. G., Pisarev A. V. Research and Development of Mathematical Models of Elements of a Gas-Air Flow for Improvement of Automatic Control System of Organic Waste Processing Plant, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 10, pp. 575–583.

DOI: 10.17587/mau.21.575-583

References

1. **Garkusha V. V., Kvashnin A. G., Mishnev A. S., Pisarev A. V., Safronov A. V., Shakirov S. R., Yakovlev V. V.** Control and adjustment of the automated process control system during high-temperature tests. Analysis of the results of high-temperature tests. Completion of the automated process control system based on the test results, *A report on the implementation of scientific research and development*. Registration number of report: 115120210006. Registration number of IKBRS: AAAA-B16-216082340009-3. Registration date 23/08/2016, — 60 p. URL: <https://rosrid.ru/ikrbs/downloadFullText/OA5QAF74AHCFDCNPIONYNETE> (Treatment date: 30.10.2019) (in Russian).
2. **Shakirov S. R., Kvashnin A. G., Pisarev A. V.** Simulation of the adaptive control system of the drying process in an organic waste recycling plant, *Autometry*, 2018, no. 5, pp. 122–128 (in Russian).
3. **Shakirov S. R., Kvashnin A. G., Pisarev A. V.** Synthesis of Neuro-Fuzzy Controller of Thermal Load of Organic Waste Processing Plant, *Industrial Automatic Control Systems and Controllers*, 2019, no. 9, pp. 54–62 (in Russian).
4. **Vilchek S. Y., Garkusha V. V., Kvashnin A. G., Mishnev A. S., Storozhev F. N., Yakovlev V. V.** Components of automatic control system for processes of biomass conversion in rotating thermo-chemical reactor, *Computational technologies*, 2013, vol. 18, Proceedings of Russian conference "Industrial Information Systems — 2013", pp. 145–149 (in Russian).
5. **Vilchek S. Yu., Kvashnin A. G., Safronov A. V., Storozhev F. N.** Problems of creating an adaptive control system for the energy complex for the processing of carbonaceous waste, *"Industrial information systems — 2015". All-Russian conference with international participation: Collection of abstracts*, Novosibirsk city, DTICT SB RAS, 2015, pp. 15–16 (in Russian).
6. **Basu Prabir.** Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory, 2nd Edition, UK, Elsevier Inc., 2013, 530 p.
7. **Shakirov S. R., Kvashnin A. G., Pisarev A. V.** Development of a mathematical model of the gas-air path of the organic waste processing plant, *Collection of scientific papers of the X all-Russian conference "The science. Technologies. Innovations"*, Novosibirsk, 05-09 December 2016, Part 1, pp. 46–48 (in Russian).
8. **Profos P.** Regulation of steam power plants, Moscow, Energiya, 1967, 368 p. (in Russian).
9. **Demchenko V. A.** Automation and modeling of technological processes of nuclear power plants and thermal power plants, Odessa, Astroprint, 2001, 302 p. (in Russian).
10. **Ponomarev A. A.** Development and research of the modernized multichannel PD-regulator for stabilization of operation modes of the thermal-power boiler: Dis.... Cand. tech. sciences 05.13.01. Novosibirsk, 2013, 122 p. (in Russian).
11. **Lozhechnikov V. F., Mikhailenko V. S., Maksimenko I. N.** Analytical multi-mode mathematical model of gas-air path dynamics of medium-capacity drum boiler, *AAECS (Automation, automation, electrical complexes and systems), Modeling of objects and control systems*, 2007, no. 2, vol. 20, pp. 29–33 (in Russian).
12. **Bednarzhevskii V. S.** Parametric modeling of steam boiler units, *News of universities. Machinery construction*, 2002, no. 4, pp. 65–69 (in Russian).
13. **Shakirov S. R., Kvashnin A. G., Pisarev A. V.** Modeling automatic control system for continuous dosing of bulk materials, *Bulletin of the East Kazakhstan State Technical University D. Serikbaeva*, 2018, vol. 1, no. 3-1, pp. 77–90 (in Russian).
14. **Ganapathy V.** Steam Generators and Waste Heat Boilers: For Process and Plant Engineers, NY, CRC Press, 2014, 540 p.
15. **Tikhonov O. N.** Solution of tasks on automation of enrichment and metallurgy processes, Leningrad, Nedra, 1969, 432 p. (in Russian).
16. **Petrazhitsky G. B., Krutov V. I.** Problem book on technical thermodynamics and theory of heat and mass transfer, Moscow, V'ishya shcola, 2011, 384 p. (in Russian).
17. **Brian Elmeggaard.** Simulation of boiler dynamics — Development, Evaluation and Application of a General Energy System Simulation Tool. Technical University of Denmark, Department of Energy Engineering. Ph.D. Thesis: Report Number ET—PhD 99—02, 1999, 302 p.
18. **Golovenkin A. N., Beltugov A. G.** Dynamic model of gas-air path of steam boiler as an object of regulation, *All-Russian yearly scientific and technical conference "society, science, innovation" (NTK-2012)*, Kirov, VyatGU, 2012, pp. 1143–1146 (in Russian).
19. **Anthony Barber.** Pneumatic Handbook, 8th edition, UK: Elsevier Science & Technology Books, 1997, 659 p.
20. **Lebedev V. V.** Drying of granular materials in the apparatus with a modified vortex layer: Dis. ... Cand. tech. sciences: 05.17.08, Tver, 2007, 121 p. (in Russian).
21. **Available** at: [http://ventclima.biz/f/vr_240-26_\(vr_12-26\).pdf](http://ventclima.biz/f/vr_240-26_(vr_12-26).pdf) (Treatment date: 30.10.2019) (in Russian).
22. **Available** at: <http://tehnorostmash.ru/images/v92-tyagodut-mashiny-VD-i-D.pdf> (Treatment date: 30.10.2019) (in Russian).
23. **Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, Mehmet Kanoglu.** Thermodynamics An Engineering Approach. 8th Edition, NY, McGraw-Hill Companies, Inc., 2019, 1009 p.
24. **Bezgreshnov A. N., Lipov Yu. M., Shleifer B. M.** Calculation of steam boilers in examples and tasks, Moscow, Al'anS, 2018, 240 p. (in Russian).