

# УПРАВЛЕНИЕ В ЭКОНОМИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

---

УДК 681.54

*А.И. Брунеткин, К.В. Беглов, М.М. Максимов, Е.О. Улицкая*

## МОДЕЛЬ И МЕТОД УПРАВЛЯЕМОГО ПИРОЛИЗА ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА

**Ключевые слова:** управляемый пиролиз, фильтрационное горение, сверхдиабатный режим.

### Введение

Задачи экологии играют значительную роль в жизни современного общества. В качестве примера следует отметить производство электроэнергии от возобновляемых источников. Важным направлением является утилизация различного вида отходов с одновременным получением вторичных энергоресурсов.

Из-за неизвестного переменного состава получаемого горючего осложняется его использование в энергогенерирующих установках. Для решения этой проблемы актуальна разработка модели и метода управления процессом термического преобразования вторичных энергоресурсов при одновременном определении в режиме реального времени их обобщенной химической формулы и теплотворной способности.

Один из путей решения проблемы, связанной с переменностью состава перерабатываемых органических веществ, — сортировка отходов в целях гомогенизации состава фракций [1]. Состав даже сортированного мусора может изменяться в зависимости от региона его сбора или времени года. Отсутствие в большинстве мест налаженной системы сортировки органических отходов — сдерживающий фактор их переработки.

В [2] в качестве переработки органической части выделяется анаэробное сбраживание. Переработка неразлагаемой или плохо биоразлагаемой части органических отходов на мусоросжигающих заводах считается наиболее грязным способом их утилизации [3].

В настоящий момент выделенные особенности для организации управляемого процесса использования продуктов медленного пиролиза требуют фиксированного и известного состава исходного сырья. Процесс медленного пиролиза можно считать предпочтительным при переработке органических отходов для получения вторичных энергоресурсов. Выделяют низко- и высокотемпературный медленный пиролиз. Как показывают теоретические [4] и экспериментальные [5] исследования с ростом температуры процесса увеличивается выход горючей газообразной фазы. При высокой температуре (~ 1500 °С) и наличии необходимого количества паров воды масса углеродистого остатка и конденсирующейся фазы может быть сведена к минимуму.

Во многих случаях пиролиз рассматривается как процесс термического разложения органических веществ без доступа воздуха. Но более корректно пиролиз

© А.И. БРУНЕТКИН, К.В. БЕГЛОВ, М.М. МАКСИМОВ, Е.О. УЛИЦКАЯ, 2021

следует рассматривать как процесс разложения при недостатке воздуха [6], как частный случай процесса газификации органических веществ и, в еще более широких границах, как сжигание при недостатке воздуха [7].

При повышенном влагосодержании процесс газификации соответствует фильтрационному горению в сверхадиабатическом режиме [8]. Такой процесс позволяет сжигать органические вещества низкой калорийности либо проводить его таким образом, чтобы до 95 % тепловой энергии сгорания было преобразовано в образующиеся продукты в газовой фазе. В [9] предложен метод определения в режиме реального времени брутто-формулы и теплотворной способности газообразного топлива в процессе его сжигания в специальном устройстве. В качестве исходных данных используются величины замеренных расходов газа и воздуха, а также температуры продуктов сгорания. Объединение технологии пиролиза, построенной на основе метода газификации в сверхадиабатическом режиме [8], с методом определения в режиме реального времени состава продукт-газа [9] создает возможность автоматизированного управления переработкой органических веществ произвольного и переменного состава. В настоящий момент в открытых источниках не выявлены автоматизированные системы управления пиролизными установками, позволяющие вести регулирование процесса получения продукт-газа из органического сырья произвольного и переменного состава. Поэтому разработка модели объекта управления и автоматизированной системы управления термического преобразования органических веществ переменного состава является актуальной задачей.

#### **Цель и задачи исследования**

Цель данного исследования — разработка модели объекта управления и автоматизированной системы управления термического преобразования органических веществ переменного состава для производства продукт-газа с максимальной теплотворной способностью на основе метода газификации в сверхадиабатическом режиме. Это позволит рационально утилизировать органические вещества различного происхождения с технологической, энергетической и экологической позиций.

Для достижения цели решены следующие задачи.

1. Рассмотрен принцип действия установки термического преобразования органических веществ переменного состава. Разработана имитационная модель процесса пиролиза по методу газификации сверхадиабатического режима, который, в зависимости от состава исходного сырья, позволяет получить продукт-газ с максимальной теплотворной способностью при минимальном количестве углеродного остатка.

2. Исследовать объект управления с помощью модели на устойчивость и управляемость при различных технологических режимах работы установки пиролиза.

3. Формализовать целевую функцию управления пиролизной установкой для получения продукт-газа максимальной теплотворной способности при заданном его расходе и переменном составе исходного сырья и синтезировать систему управления установкой для получения продукт-газа при наличии возмущений составом исходного сырья и расходом потребляемого продукт-газа.

#### **Метод решения задачи**

1. *Принцип действия установки термического преобразования органических веществ переменного состава.*

Рассмотрим принципиальную схему установки термического преобразования органических веществ переменного состава по методу газификации сверхадиабатического режима.

При рассмотрении процессов фильтрационного горения в сверхадиабатическом режиме исходят из построения макрокинетических моделей [8]. В [7, 8, 10] показано,

что при малых скоростях компонентов в установке происходят процессы превращения, близкие к равновесным. Расчеты на основе равновесных моделей строятся с учетом всех потоков энтальпии. Методы расчета таких характеристик существуют [11], но они сложны в применении. Потери через стенки установки могут быть уменьшены за счет мероприятий, описанных в [12].

При рассмотрении пиролиза древесины выделяется несколько стадий с обозначением их температурных границ и направления соответствующих энергетических потоков [13]:

- до температуры  $\sim 150$  °C с потреблением энергии — сушка сырья; до температуры  $300 \dots 400$  °C с потреблением энергии; первоначальное разложение с выделением газообразных продуктов и началом обугливания; при дальнейшем нагреве — бурное разложение сырья с выделением большого количества энергии.

Для обеспечения максимальной теплотворной способности образующегося при пиролизе продукт-газа на (рис. 1) показана схема процесса, которая заключается

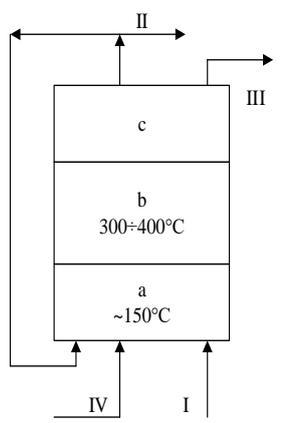


Рис. 1

в сушке и нагреве исходного сырья также продуктами реакции после зоны окисления, но в спутном потоке. Для этого часть продуктов реакции (продукт-газа) при их высокой температуре подается на вход камеры вместе с исходным сырьем. Далее они движутся в одном направлении. В результате продукты сушки и начального разложения поступают в зону окисления. Если в подаваемой на вход реактора по рециркуляционной линии части продукт-газа будет достаточно энергии для сушки и нагрева исходного сырья до конечной температуры зоны предварительного пиролиза ( $300 - 400$  °C), начнется зона выделения энергии и саморазложения древесины. Она совпадает с зоной окислительных процессов, которые проходят за счет кислорода из  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  и восстановлением последних до  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ . В случае недостатка энергии и при необходимости повышения температуры продукт-газа на выходе из реактора на его вход должно подаваться необходимое количество воздуха.

Для возможности переработки органических веществ переменного состава пиролизная установка должна быть оснащена автоматизированной системой управления, которая позволяет:

Для возможности переработки органических веществ переменного состава пиролизная установка должна быть оснащена автоматизированной системой управления, которая позволяет:

- в стационарном режиме при известном текущем составе сырья полностью его газифицировать за счет регулирования подачи воздуха;
- в стационарном режиме определять текущий состав сырья, а при его изменении — его новый текущий состав;

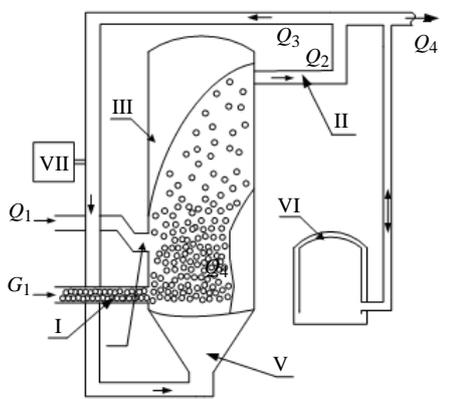


Рис. 2

- в переходных режимах, при определении состава исходного сырья, определять его энтальпию.

На рис. 2 показана схема пиролизной установки, в основу работы которой положен описанный принцип. Через коллектор I с расходом  $G_1$  на вход в реактор III подается исходное сырье (шихта). Через коллектор II на выходе из реактора с расходом  $Q_2$  в общую систему поступает горячий продукт-газ, где он разделяется на два потока с рас-

ходами:  $Q_4$  — потребителю;  $Q_3$  — по рециркуляционной линии на вход V в реактор для нагрева и сушки исходного сырья. Через коллектор IV подается необходимое количество воздуха с расходом  $Q_1$ .

При стационарном режиме работы и полной газификации органической составляющей исходного сырья брутто-формула продукт-газа соответствует брутто-формуле исходного сырья. Состав продукт-газа и соответственно его постоянство контролируются с помощью устройства VII. Его работа построена на основе метода [9] определения брутто-формулы смеси горючих газов в процессе их сжигания в специальном устройстве [12].

При фиксации изменения состава продукт-газа установка из режима пиролиза переводится в режим горения. Это выражается в увеличении подачи воздуха через коллектор IV для гарантированного преобразования исходного сырья с изменившимся неизвестным составом в газообразные продукты. Далее в устройстве VII определяется их брутто-формула и соответственно новый состав исходного сырья. Далее на основании этих данных установка переводится в режим пиролиза путем регулирования подачи воздуха в соответствии с новым составом сырья.

Рассмотрим статическую модель объекта управления термического преобразования органических веществ переменного состава. В основу положена имитационная модель, предложенная в [4]. Рассмотрим протекающие процессы в предположении, что продукты реакции находятся в газообразном или конденсированном (углистый остаток) состоянии. Это справедливо при условии равновесности протекающих процессов. Закон сохранения вещества позволяет определить перечень элементов и их количество в продуктах реакции, исходя из брутто-формулы исходного вещества. На основе ограниченного количества основных химических элементов, которые могут входить в состав исходного вещества ( $C, H, O, N$ ), может быть определен перечень основных веществ, входящих в состав продуктов реакции. Этот перечень идентифицируется на основе предварительных расчетов, известных экспериментальных данных и включает в себя:



Здесь  $C_U$  — углистый остаток. Это условие выполняется и при подаче на вход реактора продуктов реакции (см. рис. 1, 2). Температура в равновесной зоне реакций определяется на основе закона сохранения энергии. Он выражается в равенстве энтальпий в исходных продуктах и продуктах реакции.

Используя принятые допущения, обобщенная модель процессов построена на основе метода, предложенного в [14]. В его рамках рассмотрим виды уравнений, входящих в модель, и их особенности.

**Закон действующих масс.** Для каждого из веществ (1), входящих в состав продуктов реакции, записывается уравнение термодинамического равновесия. На примере  $CO_2$  оно имеет вид

$$K_{CO_2}(T) = \frac{P_C \cdot P_O^2}{P_{CO_2}}. \quad (2)$$

Здесь  $K_{CO_2}(T)$  — константа химического равновесия при температуре  $T$  для равновесной реакции образования  $CO_2$  из элементов  $C$  и  $O$  (табличная величина);  $P_{CO_2}$ ,  $P_C$ ,  $P_O$  — парциальные давления соответствующих компонентов в смеси

продуктов сгорания. Использование парциальных давлений вместо концентраций возможно в случае рассмотрения определенного количества молей  $M_T$  исходного вещества. Значение  $M_T$  является дополнительной неизвестной величиной и подлежит определению.

Одна из особенностей модели при использовании парциальных давлений вместо концентраций проявляется в записи соответствующего уравнения для углистого остатка. Уравнение имеет вид

$$K_U(T) = \frac{P_C}{P_U}. \quad (3)$$

В данном уравнении в процессе решения величина  $P_U$  при заданной температуре в отличие от остальных величин парциальных давлений остается постоянной.

**Закон сохранения вещества.** Уравнения записываются для каждого из химических элементов, определяющих состав исходного вещества, в виде баланса его количества в исходном веществе и продуктах реакции. Уравнения записываются с учетом величины  $M_T$  исходного вещества. В качестве примера для элемента  $C$  оно имеет вид

$$M_T \cdot b \cdot C = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{CH_4} + P_U + P_C. \quad (4)$$

В левой части уравнения отображено количество атомов углерода в исходном веществе. При этом  $b$  — количество атомов в одном моле исходного вещества.

**Закон Дальтона.** Появление переменной  $M_T$  для замыкания системы требует введения дополнительного уравнения. В его качестве выступает сумма парциальных давлений продуктов реакции, равная давлению в реакторе,

$$P_\Sigma = \sum_i P_i. \quad (5)$$

Здесь  $P_\Sigma$  — давление газовой фазы в реакторе,  $P_i$  — парциальные давления компонентов продуктов реакции. В этом случае также проявляется особенность, связанная с наличием углистого остатка. Предполагается, что его объем мал по сравнению с объемом газовой фазы. Поэтому величина  $P_U$  не учитывается в уравнении (5).

В стационарном режиме смесь продуктов реакции имеет такую же брутто-формулу, как и исходное вещество. Регулируемое использование продуктов реакции в качестве греющего агента не изменяет состав результирующей смеси. Регулируемая подача исходного сырья только увеличивает количество. Это определяет особенность модели объекта управления.

Для демонстрации результатов моделирования в качестве исходного органического вещества принята сухая древесина сосны с брутто-формулой  $CH_{1.44}O_{0.64}N_{0.009}$ . Вода учитывается как мольная доля  $\varphi$  в составе древесины.

В [8] отмечено, что в зоне окисления (см. рис. 1) температура составляет 1000–1200 °С. Поэтому и в выполненных расчетах температура в зоне равновесных реакций рассматривалась до величины 1500 К. Результаты расчетов равновесных температур при различных сочетаниях степени увлажнения исходного сырья ( $\varphi$ ) и количества подаваемого воздуха ( $\alpha$ ) приведены в табл. 1. Полученные значения показывают, что температура в зоне окисления может достигать величин, соответствующих значениям в работе [8] без подачи воздуха или при малом его количестве.

Для значений  $\alpha$  и  $\phi$ , приведенных в табл. 1, выполнены расчеты по определению располагаемой энергии при охлаждении продуктов реакции до температуры  $\sim 400$  0С ( $\sim 670$  К) и необходимой для нагрева исходного сырья до этой же температуры.

Таблица 1

$\phi$	A	A	A	A
	0	0,1	0,2	0,3
0	1020	1095	1170	1310
0,1	1090	1140	1260	1500
0,2	1160	1340	1415	
0,3	1240	1380		
0,4	1380	1420		

Получены относительные энергетические характеристики, которые учитывали энергию, необходимую для нагрева древесины, воздуха, воды до 100 °С, ее испарения и нагрева образовавшегося пара. Результаты расчета приведены в табл. 2 в виде величины, равной отношению необходимой энергии к располагаемой. Эти величины показывают, какую часть продуктов реакции достаточно использовать для ее поддержания. В табл. 3 приведены результаты расчета количества углистого остатка для различных значений  $\phi$  и  $\alpha$ . Величины даны в молях углистого остатка на 1 моль исходного вещества.

Таблица 2

$\phi$	$\alpha$			
	0	0,1	0,2	0,3
0	0,67	0,67	0,55	0,44
0,1	0,82	0,82	0,58	0,41
0,2	0,88	0,88	0,53	
0,3	0,89	0,89		
0,4	0,77	0,77		

Таблица 3

$\phi$	$\alpha$			
	0	0,1	0,2	0,3
0	0,59	0,28	0,11	0,02
0,1	0,41	0,17	0,04	0,002
0,2	0,26	0,04	0,005	
0,3	0,13	0,04		
0,4	0,05	0,005		

Приведенные данные показывают возможность полного окисления углистого остатка влажного исходного вещества без кислорода воздуха или при минимальном его количестве. Результаты расчетов в табл. 1–3 получены для веществ с брутто-формулами, приведенными в табл. 4.

Таблица 4

$\phi$	$\alpha$			
	0	0,1	0,2	0,3
0	$C_{1,44}H_{1,44}O_{0,64}N_{0,009}$	$C_{0,668}H_{0,962}O_{0,567}N_{0,531}$	$C_{0,501}H_{0,722}O_{0,530}N_{0,792}$	$C_{0,401}H_{0,578}O_{0,508}N_{0,950}$
0,1	$C_{0,885}H_{1,504}O_{0,681}N_{0,008}$	$C_{0,592}H_{1,006}O_{0,595}N_{0,528}$	$C_{0,445}H_{0,756}O_{0,551}N_{0,790}$	$C_{0,356}H_{0,605}O_{0,525}N_{0,948}$
0,2	$C_{0,794}H_{1,556}O_{0,714}N_{0,007}$	$C_{0,532}H_{1,042}O_{0,617}N_{0,527}$	$C_{0,400}H_{0,783}O_{0,568}N_{0,788}$	
0,3	$C_{0,714}H_{1,6}O_{0,743}N_{0,0064}$	$C_{0,479}H_{1,073}O_{0,637}N_{0,525}$		
0,4	$C_{0,654}H_{1,634}O_{0,765}N_{0,0059}$	$C_{0,439}H_{1,097}O_{0,652}N_{0,524}$		

2. *Исследование объекта управления по его динамической модели.* На основе приведенного выше описания пиролизной установки разработана имитационная математическая модель, которая описывает динамические свойства аппарата по следующим каналам:

- расход воздуха  $Q_1$  — расход продукт-газа  $Q_2$ ;
- расход исходного сырья  $G_1$  — расход продукт-газа  $Q_2$ ;
- расход рециркуляционного газа  $Q_3$  — расход продукт-газа  $Q_2$ ;
- расход воздуха  $Q_1$  — температура пиролиза  $t$ ;
- расход исходного сырья  $G_1$  — температура пиролиза  $t$ ;
- расход рециркуляционного газа  $Q_3$  — температура пиролиза  $t$ ;
- расход воздуха  $Q_1$  — состав продукт-газа  $Q_{н\text{ пг}}^p$ ;
- расход исходного сырья  $G_1$  — состав продукт-газа  $Q_{н\text{ пг}}^p$ .

Параметрическая схема регулируемого аппарата приведена на рис. 3.

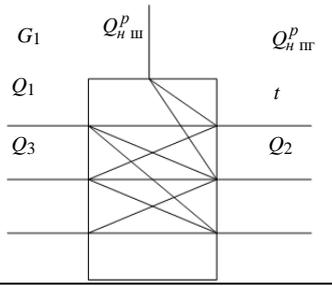


Рис. 3

Конструкция пиролизной установки идентична конструкции топки с кипящим слоем. Топки с кипящим слоем применяются в энергетике с 60-х годов XX столетия, поэтому их динамические свойства достаточно известны. В работах [15–18] приведены математические модели кипящего слоя с точки зрения управления температурой кипящего слоя и объема газовой смеси на выходе из слоя.

Традиционно динамические свойства объекта управления получают на основании рассмотрения уравнений сохранения энергии и массы.

Для пиролизной установки по аналогии с топкой кипящего слоя можно записать:

$$\frac{dT_L}{dt} S_L \rho_L c_L H_L = G_{ch} Q_{ch}^w + Q_1 h_1 + Q_3 Q_n^w - Q_2 Q_n^w - I_{ash} - I_R, \quad (6)$$

где  $T_L$  — температура слоя и температура газа;  $S_L$  — площадь зеркала реакции пиролиза;  $\rho_L, \rho_g$  — насыпная плотность слоя и плотность газа;  $c_L, c_g$  — теплоемкость материала слоя и теплоемкость газа;  $H_L$  — высота слоя;  $G_{ch}$  — расход исходного сырья (шихты),  $Q_1, Q_2, Q_3$  — расходы воздуха, продукт-газа, рециркуляционного газа;  $Q_{ch}^w$  — теплотворная способность исходного сырья (шихты);  $Q_n^w$  — теплотворная способность продукт-газа и рециркуляционного газа;  $I_{ash}, I_R$  — потери теплоты с отводимой золой и излучением.

Так как брутто формула продукт-газа совпадает с брутто-формулой исходного сырья и зависит от количества подаваемого воздуха, то, соответственно, состав продукт газа определяется составом исходного сырья и расходом воздуха. В качестве параметра, характеризующего состав продукт-газа, выбрана его теплотворная способность. После записи слагаемых уравнения (6) в виде приращений получим уравнение в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dT_L}{dt} S_L \rho_L c_L H_L = \Delta G_{ch} \bar{Q}_n^w + \bar{G}_{ch} \Delta Q_n^w + \Delta Q_1 \bar{c}_1 \bar{T}_1 + \Delta Q_3 \bar{c}_L \bar{T}_L + \\ + \bar{Q}_3 \bar{c}_L \Delta T_L - \Delta Q_2 \bar{c}_L \bar{T} - \bar{Q}_2 \bar{c}_L \Delta T_L \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \frac{S_L \rho_L H_L}{\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3} \frac{dT_L}{dt} + \Delta T_L = \frac{\bar{c}_{ch} (T_L - \bar{T}_{ch})}{\bar{c}_L (\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta G_{ch} + \frac{\bar{G}_1}{\bar{c}_L (\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_n^w + \\ + \frac{\bar{c}_1 (T_L - \bar{T}_1)}{\bar{c}_L (\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_1 + \frac{\bar{T}_L}{(\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_3 - \frac{\bar{T}_L}{(\bar{Q}_2 - \bar{Q}_3)} \Delta Q_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Выше было указано, что процесс пиролиза должен вестись так, чтобы энтальпии сырья и синтез газа были одинаковы. Это достигается обеспечением сверхadiaбатического режима процесса пиролиза. Поскольку рециркуляционный газ — это часть продукт-газа, поданного обратно в установку, то их теплотворная способность одинакова, зависит только от температуры пиролиза. Поэтому по каналам « $G_{ch} - T_L$ », « $Q_1 - T_L$ », « $Q_2 - T_L$ », « $Q_3 - T_L$ » регулируемый аппарат пред-

ставляет собой инерционное звено первого порядка с запаздыванием. Транспортное запаздывание определяется длиной подводящих и отводящих трубопроводов.

Из рассмотрения закона сохранения массы внутри пиролизной установки

$$\frac{dm}{dt} = G_{ch} + Q_1 + Q_3 - Q_2 \quad (8)$$

и уравнений химической кинетики, рассмотренных ранее, можно сделать вывод, что по каналам « $Q_1 - Q_2$ », « $G_1 - Q_2$ » « $Q_3 - Q_2$ » регулируемый аппарат представляет собой инерционное звено. Инерционность объекта определяется скоростью распространения фронта пиролитического разложения.

Взаимосвязи между входными и выходными параметрами регулируемого аппарата могут быть представлены в виде таблицы передаточных функций. Коэффициенты передачи передаточных функций были определены из расчета процесса пиролиза с помощью модели, описанной выше.

Таблица 5

Входы Выходы	Расход воздуха $Q_1$ , моль/с	Расход исходного сырья $G_1$ , моль/с	Расход рециркуляционного газа $Q_3$ , моль/с	Теплотворная способность сырья, $Q_{ch}^w$
Расход продукт-газа $Q_2$ , моль/с	$W(s) = \frac{1}{T_1s+1}$	$W(s) = \frac{1}{T_1s+1}$	$W(s) = \frac{1,83}{T_1s+1}$	—
Температура пиролиза $T_L$ , С	$W(s) = \frac{600e^{-\tau s}}{T_2s+1}$	$W(s) = \frac{300e^{-\tau s}}{T_2s+1}$	$W(s) = \frac{300e^{-\tau s}}{T_2s+1}$	$W(s) = \frac{200e^{-\tau s}}{T_2s+1}$
Теплотворная способность продукт-газа $Q_n^w$	$W(s) = \frac{k \left( \frac{Q_1}{G_1} \right) e^{-\tau s}}{T_1s+1}$	$W(s) = \frac{k(Q_n^w \cdot G_1) e^{-\tau s}}{T_1s+1}$	—	$W(s) = \frac{1e^{-\tau s}}{T_1s+1}$

Регулируемый аппарат по каналам «расход воздуха–состав продукт-газа» и «расход сырья–состав продукт газа» имеет нелинейные свойства. Основываясь на результатах исследований [19, 20], принята квадратичная зависимость теплотворной способности продукт-газа от соотношения расходов сырья и воздуха:

$$Q_n^w = Q_{n0}^w (1 - k(Q_1 - G_{ch}V_0)^2), \quad (9)$$

где  $Q_n^w$  — теплотворная способность продукт-газа;  $Q_{n0}^w$  — максимально возможная теплотворная способность, зависит от состава исходного сырья, на данном этапе принято  $Q_{n0}^w = 1$ ;  $V_0$  — объем воздуха, необходимый для пиролиза 1 моль исходного сырья. Зависит от состава сырья;  $k$  — коэффициент пропорциональности. Определяется расчетным или экспериментальным путем для конкретного состава сырья. На данном этапе принято  $k = 0,2$ .

При разработке математической модели процесса пиролиза зависимость выделения энергии при окислении сырья воздухом от расхода сырья и его теплотворной способности описана зависимостью

$$Q = Q_n^w \cdot \Delta G_1 + G_1 \cdot \Delta G_n^w + \Delta G_n^w \cdot \Delta G_1. \quad (10)$$

Поскольку постоянные времени и величины запаздывания определяются геометрическими размерами аппарата и должны уточняться индивидуально для каждой установки, то на данном этапе исследования они приняты в соответствии с экспериментальными данными, полученными в [17, 18]:  $T_1 = 400$  с,  $T_2 = 500$  с,  $\tau = 10$  с.

Структурная схема регулируемого аппарата показана на рис. 4.

При производстве продукт-газа после пиролизной установки устанавливается «мокрый газгольдер», обозначенный VI на рис. 2. Это позволяет иметь буферную емкость для сглаживания расхода продукт-газа при резких изменениях его потребления. Кроме того, изменение уровня в газгольдере может служить еще одним регулируемым параметром, который показывает небаланс между потребляемым и генерируемым количеством продукт-газа. Преимуществом такой схемы является отсутствие необходимости в измерении расхода газа переменного состава.

Таким образом, в объекте регулируемые параметры являются:

- уровень жидкости в газгольдере как сигнал небаланса между заданным и текущим расходами продукт-газа;

- температура пиролиза (продукт-газа);
- состав продукт-газа.

Управляющими воздействиями являются:

- расход исходного сырья;
- расход воздуха;
- расход рециркуляции продукт-газа.

Внешними возмущениями на объект являются:

- заданный расход продукт-газа;
- состав исходного сырья.

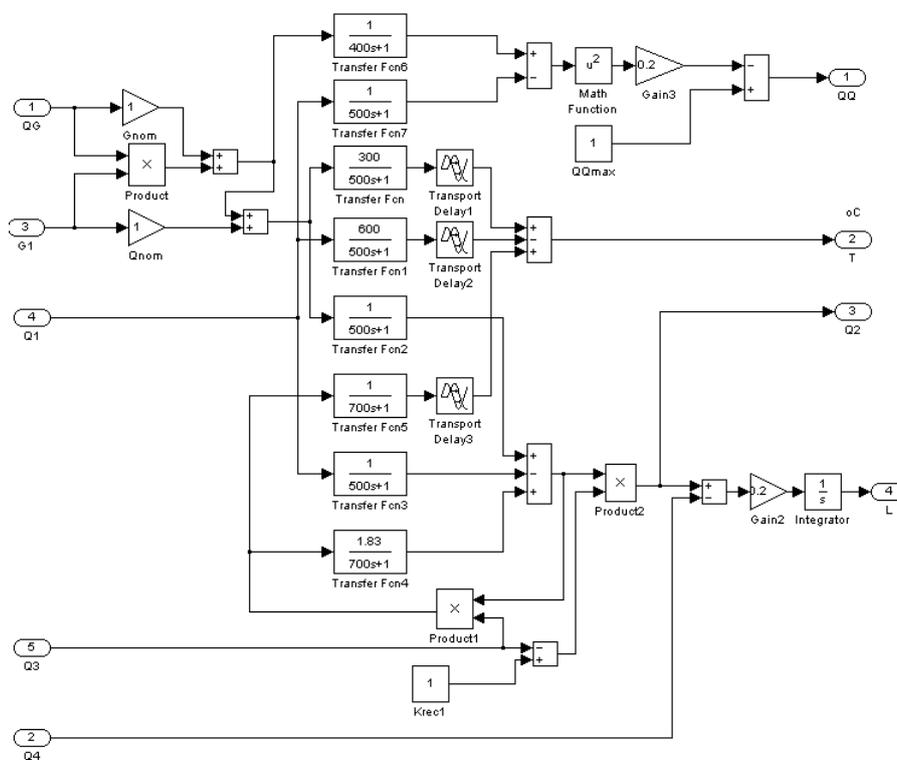


Рис. 4

Для анализа устойчивости и управляемости объекта управления модель, представленная в табл. 5 в виде передаточных функций, приведена к форме матриц в пространстве состояний:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t),$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t).$$

Для указанных коэффициентов модели матрицы имеют следующие значения:

- матрица состояний

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0001 & 0 & 0 \\ 0 & -0,002 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,002 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,002 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,002 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,0014 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,0014 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,0167 \end{vmatrix}$$

- матрица входов

$$B = \begin{vmatrix} 0 & 0 & -0,02 & -0,02 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

- матрица выходов:

$$C = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,6 & -1,002 & 0 & 0 & 0 & 0,0014 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0167 \end{vmatrix}$$

Матрица  $D$  — нулевая, размером  $4 \times 5$ .

Анализ математической модели пиролизной установки показал, что характеристическое уравнение системы имеет семь вещественных и один нулевой корень. Из этого следует, что по каналу управления уровнем в газгольдере объект нейтральный, а по остальным каналам устойчивый.

Количество регулируемых переменных соответствует количеству управляющих воздействий, однако ранг матрицы управляемости по критерию Калмана равен 5, что меньше порядка системы, равного 8. Следовательно, объект не полностью управляем.

Также по всем каналам получены кривые разгона. Входы и выходы соответствуют табл. 5.

Интерес представляют свойства объекта управления по каналам, имеющим нелинейные свойства: расход рециркуляционного газа  $Q_2$  — расход продукт-газа  $Q_2$ , расход рециркуляционного газа  $Q_3$  — температура пиролиза  $T_L$ , теплотворная способность сырья  $Q_{ch}^w$  — теплотворная способность продукт-газа  $Q_n^w$ .

По остальным каналам свойства объекта линейны в рабочем диапазоне и соответствуют приведенным передаточным функциям.

Кривые разгона представлены на рис. 5–7.

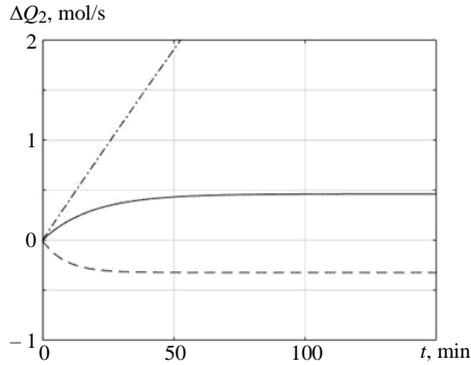


Рис. 5

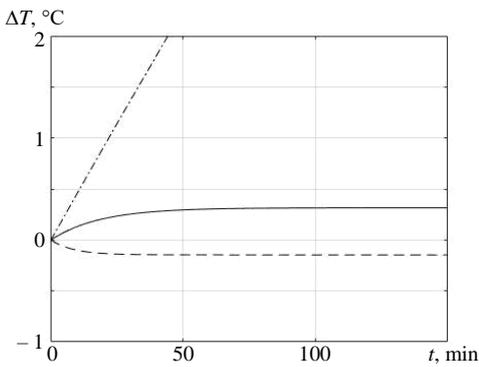


Рис. 6

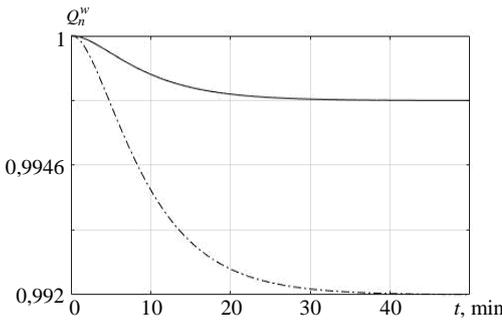


Рис. 7

Функционирования пиролизной установки — это выработка требуемого расхода продукт-газа максимальной теплотворной способности при колебаниях состава исходного сырья.

Для достижения указанной цели пиролизная установка должна быть снабжена автоматизированной системой регулирования, имеющая три контура регулирования:

Несмотря на наличие связи между расходом сырья  $G_1$  и теплотворной способностью продукт-газа  $Q_n^w$ , в линейной модели отсутствует кривая разгона по указанному каналу, так как коэффициент передачи зависит от произведения расхода исходного сырья на его теплотворную способность, как показано в (10). И при отсутствии отклонения состава сырья, состав продукт-газа также не меняется.

В ходе исследований установки обнаружено наличие положительной обратной связи в канале « $Q_3 - Q_2$ » (расход рециркуляции — расход продукт-газа), что делает возможным такие режимы работы установки, когда она переходит из устойчивого состояния в неустойчивое. Свойства объекта управления по указанному каналу нелинейны и определяются соотношением между расходами исходного сырья  $G_1$  и расхода рециркуляции продукт-газа  $Q_3$ . Это можно увидеть в строке 4 табл. 5. Однако уменьшение расхода исходного сырья опять переводит установку в устойчивое состояние.

3. *Формализация задачи управления и синтез системы управления установкой для получения продукт-газа.* С точки зрения технологического процесса, основная цель функ-

- регулятор расхода продукт-газа, измеряющий уровень жидкости в газгольдере и изменяющий расход исходного сырья;
- регулятор температуры реакции пиролиза, измеряющий температуру продукт-газа и изменяющий расход продукт-газа, идущего на рециркуляцию;
- регулятор состава продукт-газа, состоящий из двух регуляторов: регулятора, стабилизирующего расход воздуха в пиролизную установку, и экстремального, осуществляющего поиск оптимального соотношения расходов воздуха и исходного сырья при изменении состава последнего.

Вычисление настроек стабилизирующих регуляторов выполняется по стандартной методике настройки ПИД-регуляторов. Для стабилизации уровня принято решение использовать П-закон регулирования, так как наличие астатизма в регуляторе приводит к колебаниям регулируемой величины.

Схема автоматической системы регулирования пиролизной установки показана на рис. 8.

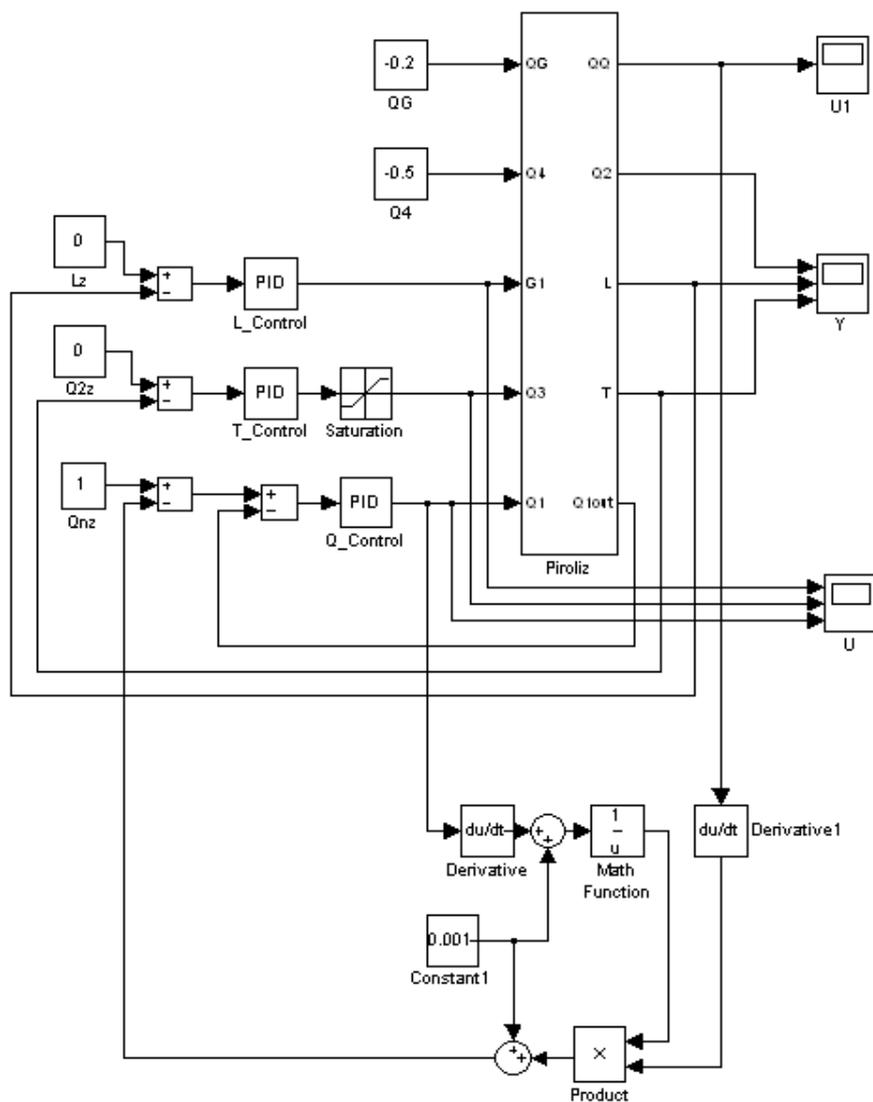


Рис. 8

Процессы регулирования при нанесении возмущений расходом продукт-газа, подающегося потребителю, и составом исходного сырья показаны на рис. 9–11.

На рис. 9 показаны отклонения регулируемых величин, на рис. 10 — отклонения управляющих воздействий, на рис. 11 — отклонения теплотворной способности продукт-газа.

Величина увеличения расхода продукт-газа на производство — 0,7 моль/с, т.е. на 70 % от номинального значения. Такая величина возмущающего воздействия выбрана специально для демонстрации ограничения на величину доли рециркулируемого продукт-газа. Величина возмущения составом исходного сырья  $\Delta Q_{ch}^w = -0,2$  (-20 %):

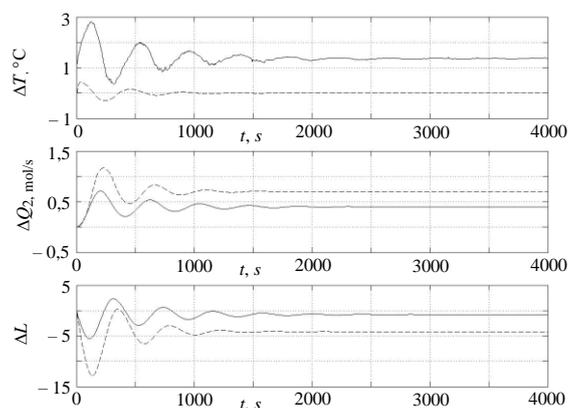


Рис. 9

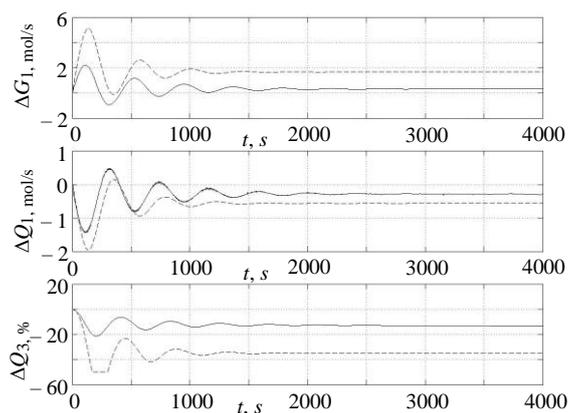


Рис. 10

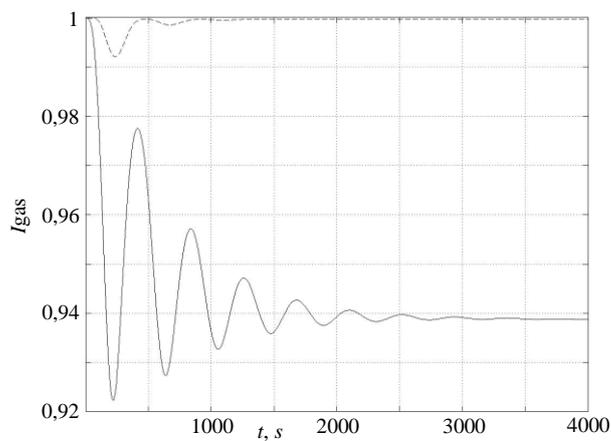


Рис. 11

Как видно из рисунков, синтезированная АСР справляется с поступающими возмущениями, расход продукт-газа  $Q_2$  устанавливается на значении, равном величине возмущения. Теплотворная способность продукт-газа при нанесении возмущения расходом продукт-газа устанавливается на максимальном значении, а при нанесении возмущения составом сырья, а именно снижением калорийности на 20 %, уменьшается на 6 %

### Обсуждение результатов решения задачи

Мы живем в органическом мире, и в настоящий момент основной объем энергии получаем при переработке (сжигании) некоторых видов органических веществ. Их выбор в настоящий момент определяется не типом вещества, а доступностью значительного количества при постоянном составе. Химическое, энергетическое оборудование рассчитывается на использование сырья определенного состава и требует тонкой настройки. Незначительное изменение состава однотипного вещества приводит к сбою или даже остановке технологических процессов. Так любой из нефтеперерабатывающих заводов работает только с определенным сортом нефти. Котлы электростанций рассчитываются на сжигание определенных сортов углей, и снабжение привязывается к определенным их месторождениям. Это происходит по причине использования систем управления, рассчитанных на парирование в режиме реального времени изменения теплофизических параметров и невозможности учета изменения химического состава сырья.

Предложенный метод переработки органических веществ позволяет оптимальным образом преобразовывать различные органические вещества в газообразное состояние. Оптимальность определяется возможностью получения максимального объема смеси горючих газов при максимальной их теплотворной способности. Оптимальность обусловлена организацией процесса пиролиза и газификации в сверхадиабатическом режиме при известном составе исходного сырья. Состав сырья в процессе переработки может произвольным образом изменяться. За счет введения в систему управления устройства определения в режиме реального времени состава газообразных продуктов реакции (VII, рис. 3) контролируется состав исходного сырья. В случае его изменения определяется новый состав. На основании полученных данных установка переводится в оптимальный режим с новыми параметрами.

На основе приведенного выше описания пиролизной установки разработана имитационная математическая модель, которая описывает динамические свойства пиролизной установки. По основным каналам регулируемый аппарат представляет собой инерционное звено первого порядка с запаздыванием. Постоянная времени и величина запаздывания определяются геометрическими размерами аппарата и должны уточняться индивидуально для каждой установки. Однако возможны такие режимы работы, когда установка переходит из устойчивого состояния в неустойчивое из-за наличия положительной обратной связи. Это определяется соотношением между расходами исходного сырья  $G_1$  и расхода рециркуляционного газа  $Q_3$ . Наличие регуляторов позволяет стабилизировать технологический процесс пиролиза на заданных значениях.

### Заключение

Разработана имитационная модель процессов пиролиза и газификации, позволяющая получить состав продукт-газа с максимальной теплотворной способ-

ністю при мінімальному кількості вуглистої рештки при різному складі початкового сировини. Мінімум кількість вуглистої рештки визначає можливість отримання максимум можливого об'єму суміші горючих газів. Максимум теплотворна здатність обумовлена організацією процесу переробки в супердіабатичному режимі з мінімум можливою використанням повітря як окислювача.

Визначено можливість існування рішення моделі по енергетичному балансу. Розраховане співвідношення необхідної для підтримки процесу піролізу і наявної в продуктах реакції енергії свідчить про можливість організації процесу без додаткової кількості повітря. Мінімум кількість додаткового окислювача забезпечує максимум теплотворну здатність утворюваного продукту-газу.

Розроблено метод управління піролізом органічного сировини для забезпечення заданого витрати продукту-газу при нанесенні збурень складом початкового сировини.

Синтезовано автоматизовану систему управління піролізною установкою, що дозволяє стабілізувати технологічний процес отримання продукту-газу на заданих технологічних значеннях.

*О.І. Брунеткін, К.В. Беглов, М.М. Максимов, О.О. Улицька*

## МОДЕЛЬ І МЕТОД КЕРОВАНОГО ПІРОЛІЗУ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН ЗМІННОГО СКЛАДУ

Розглянуто питання організації процесу повільного піролізу органічних речовин, в загальному випадку невідомого і змінного складу. Актуальність роботи визначається розглядом можливості використання різних органічних відходів (побутових, сільськогосподарських, промислових) без їх попереднього сортування і сушіння для отримання вторинних енергоресурсів відомого (контрольованого) складу. Новизна роботи обумовлена розробкою моделі методу керованого піролізу або газифікації органічних речовин з мінімальною кількістю твердих залишків при максимумній теплотворній здатності суміші, що утворює горючі гази. Розглянуто процес на основі фільтраційного горіння в супердіабатичному режимі. В існуючих пристроях при реалізації такого режиму організується зустрічний потік вихідної сировини і продуктів реакції. В результаті частина водяної пари, що утворюється на стадії сушки, становить важливу частину суміші продуктів реакції і, відповідно, знижують їх енергетичну цінність. Запропоновано до розгляду схему процесу будується на основі організації попутного потоку вихідної сировини і продуктів реакції. В результаті утворюються вуглекислий газ і пари води використовуються як додаткові окислювачі. При цьому зменшується вуглистість залишок з одночасним збільшенням у складі суміші газоподібних продуктів чадного газу і водню. Запропоновано схему моніторингу в режимі реального часу складу вихідної сировини в процесі піролізу (газифікації). Знання складу дозволяє управляти процесом його переробки з метою: організації оптимального процесу газифікації з точки зору максимумізації кількості та енергетичної цінності суміші газоподібних продуктів реакції; витратою вихідної сировини з метою виробництва необхідної кількості продукту-газу на даний момент.

**Ключові слова:** керований піроліз, фільтраційне горіння, супердіабатичний режим.

## MODEL AND METHOD OF CONTROLLED PYROLYSIS OF ORGANIC SUBSTANCES OF VARIABLE COMPOSITION

The issues of organization of the process of slow pyrolysis of organic substances, in the general case of unknown and variable composition, are considered. The relevance of the work is determined by considering the possibility of using various organic waste (domestic, agricultural, industrial) without their preliminary sorting and drying to obtain secondary energy resources of a known (controlled) composition. The novelty of the work is due to the development of a model for the method of controlled pyrolysis or gasification of organic substances with a minimum amount of solid residues at a maximum calorific value of the resulting mixture of combustible gases. A process based on filtration combustion in superadiabatic mode is considered. In existing devices, when this mode is implemented, a counter flow of the feedstock and reaction products is organized. As a result, a part of the water vapor generated at the drying stage is part of the mixture of reaction products and, accordingly, reduce their energy value. The scheme of the process proposed for consideration is based on the organization of the associated flow of feedstock and reaction products. As a result, the resulting carbon dioxide and water vapor are used as additional oxidizing agents. As a result, the carbonaceous residue decreases with a simultaneous increase in the composition of the mixture of gaseous products of carbon monoxide and hydrogen. A scheme for real-time monitoring of the composition of the feedstock during pyrolysis (gasification) is proposed. Knowledge of the composition makes it possible to control the process of its processing in order to: a) organize the optimal gasification process in terms of maximizing the amount and energy value of the mixture of gaseous reaction products; b) control the consumption of the processed feedstock in order to produce the required amount of product gas at any given time.

**Keywords:** controlled pyrolysis, filtration combustion, superadiabatic mode.

1. Rousta K., Ekström K.M. Assessing incorrect household waste sorting in a medium-sized Swedish city. *Sustainability*. 2013. N 5. P. 4349–4361. <https://doi.org/10.3390/su5104349>
2. Perrot J.F., Subiantoro A. Municipal Waste Management Strategy Review and Waste-to-Energy Potentials in New Zealand. *Sustainability*. 2018. 10, N 9. DOI: 10.3390/su10093114.
3. Seltenrich N. Emerging Waste-to-Energy Technologies: Solid Waste Solution or Dead End? *Environmental Health Perspectives*. 2016. 124, N 6. <https://doi.org/10.1289/ehp.124-A106>.
4. Brunetkin O., Maksymov M.V., Maksymenko A., Maksymov M.M. Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 4/6, N 100. P. 25–31. doi: 10.15587/1729-4061.2019.176422.
5. Guizani C., Jeguirim M., Valin S., Limousy L., Salvador S. Biomass Chars: The Effects of Pyrolysis Conditions on Their Morphology, Structure, Chemical Properties and Reactivity. *Energies*. 2017. 10, N 6. P. 796. <https://doi.org/10.3390/en10060796>.
6. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа. С.А. Ахметов, Т.П. Сериков, И.Р. Кузеев, М.И. Баязитов. Санкт-Петербург. Недра, 2006. 872 с. <http://www.-geokniga.org/bookfiles/geokniga-ahmetov-a-tehnologiya-i-oborudovanie-processov-pererabotki-nefti-i-gaza.pdf>
7. Process efficiency of biofuel production via gasification and Fischer–Tropsch synthesis. H.L. Nadia, N.H. Leibbrandt, A.O. Aboyade, J.H. Knoetze, J.F. Görgens. *Fuel*. 2013. 109. P. 484–492. doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.013,
8. Модель паровоздушной газификации твердого горючего в фильтрационном режиме. Е.А. Салганский, В.П. Фурсов, С.В. Глазов, М.В. Салганская, Г.Б. Манелис. *Физика горения и взрыва*. 2006. 42, № 1. С. 65–72. <https://docplayer.ru/86907583-Institut-problem-himicheskoy-fiziki-ran-chernogolovka.html>.

9. Determining the composition of burned gas using the method of constraints as a problem of model interpretation. O. Brunetkin, V. Davydov, O. Butenko, G. Lysiuk, A. Bondarenko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. N 3/6 (99). P. 22–30. doi: 10.15587/1729–4061.2019.169219.
10. Полианчик Е.В., Глазов С.В. Фильтрационное горение углерода в присутствии эндотермических окислителей. *Физика горения и взрыва*. 2015. **51**, № 5. С. 34–43. DOI: 10.15372/FGV20150504.
11. Identification of the Thermal Conductivity Coefficient for Quasi-Stationary Two-Dimensional Heat Conduction Equations. Yu.M. Matsevityi, S.V. Alekhina, V.T. Borukhov, G.M. Zayats, A.O. Kostikov. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017. **90**, N 6. С. 1295–1310. DOI 10.1007/s10891-017-1686-7.
12. Установка для визначення складу горючого газу в процесі його спалювання. Патент України на винахід №. 120216 : МПК G01N 7/08 (2006.01), G01N 25/20 (2006.01) / Максимов М.В., Брунеткін О.І., Лисюк О.В., Тарахтій О.С. № а 2017 12785; заявл. 22.12.2017; опубл. 11.06.2018. Бюл. №11.
13. Лямин В.А. Газификация древесины. М. : Лесная промышленность, 1967. 264 с.
14. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник. М. : ВИНТИ, 1971. **1**: Методы расчета. 266 с.
15. Duty C., Johnson R. Heat and mass-transfer modeling of an angled gas-jet LCVD system. *Applied Physics A*. 2003. N 5. P. 697–705.
16. Wolfgang, Rodi, M. Mulas. *Engineering turbulence modelling and experiments* 6. Elsevier, 2005. 1012 p.
17. Гавриленко Б.В., Неежмаков С.В. Математическая модель топки кипящего слоя шахтного автономного воздухоподогревателя в нестационарных условиях. *Проблемы эксплуатации оборудования шахтных установок*. 2005. С. 297–304.
18. Гавриленко Б.В., Неежмаков С.В. Синтез математической модели топки кипящего слоя шахтного воздухоподогревателя при нестационарных условиях для задач автоматического управления. *Моделювання та інформаційні технології*. 2010. Вип. 57. С. 164–173.
19. Модель и метод сжигания в теплоэнергетической установке углеводородного газа переменного состава. А.В. Лысюк, А.В. Бондаренко, М.М. Максимов, А.И. Брунеткин. *Автоматизация технологических и бизнес-процесов*. Одеса, 2017. **9**, № 2. С. 21–27. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI <https://doi.org/10.15673/atbp.v9i2.558>)).
20. Давыдов В.О., Бондаренко А.В. Метод расчета температуры горения произвольной смеси газообразного углеводородного топлива при произвольном избытке воздуха. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2013. № 3 (42). С. 98–102. <http://pratsi.opu.ua/app/webroot/articles/1395062033.pdf>.

Получено 04.02.2020  
После доработки 15.06.2020