



**1 ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО
УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ**

УДК 662.611.2:662.613.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЖИГАНИЯ СМЕСЕЙ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ

Максимов М.В.¹ Брунеткин А.И.¹

¹Одесский национальный политехнический университет, Одесса

Copyright © 2014 by author and the journal "Automation technological and business - processes".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



DOI: [10.15673/2312-3125.20/2015.36954](https://doi.org/10.15673/2312-3125.20/2015.36954)

Аннотация

Создан метод, позволяющий определить переменный состав, и энтальпию газообразного горючего в процессе его сжигания. Время определения состава должно мало зависеть от количества компонентов, входящих в него. Используемые при этом приборы должны входить в штатный состав обслуживаемого оборудования. На основе известной методики определения состава продуктов сгорания и их температуры при заданном составе топлива и его энтальпии построено решение по определению состава топлива и его энтальпии на основе технологических параметров, которые могут быть измерены в процессе горения. На основании предложенного метода разработаны модель и алгоритм решения обратной задачи. С целью проверки их работоспособности решен ряд прямых задач при сжигании метана, этана, этилена и их смеси в воздухе. Полученные результаты сравнены с известными данными по составу продуктов сгорания и температуре. На их основе для решения обратной задачи сформированы исходные данные, имитирующие замеры технологических параметров. Выполнено решение обратной задачи. Найденный состав горючего и его энтальпия сопоставлены с известными величинами. Разработаны метод решения и алгоритм, позволяющие определять состав и энтальпию газообразного горючего в процессе его сжигания в воздухе. Показана устойчивость решения такой задачи. Показана адекватность полученного результата исходным данным. Предложенные методика и алгоритм могут служить основой для разработки автоматического комплекса по определению состава газообразного горючего в процессе его сжигания.

Abstract

Creating a method to determine the variable composition and the energy content (enthalpy) of gaseous fuel during its combustion. Time of definition composition should little depend on a number of components included in it. Instruments used for this should be included in the regular structure serviced equipment. Based on the known methods for determining the composition of the combustion products and their temperature at a given fuel composition and its enthalpy (direct problem) constructed a solution to determine the composition of fuel and its enthalpy (inverse problem) based on the technological parameters (temperature of the combustion products and the fuel and oxidizer consumption) which can be measured in the combustion process. Based on the proposed method a model and algorithm were developed for solving the inverse task. In order to test their ability to work a number of tasks were solved in the direct combustion of methane, ethane, ethylene and their mixture in air. Obtained results were compared with known data on the composition and temperature of the combustion products. On this basis, for solving the inverse problem output data were generated that simulate measurements of process parameters. The decision of the inverse task was achieved. Found fuel composition and its enthalpy were compared with known values. A method and solution algorithm to determine the composition and enthalpy of gaseous fuel during the combustion in air were developed. The solution stability of this problem was shown. The adequacy of the results to output data was get by solving direct and inverse tasks. The proposed method and algorithm can serve as a basis for the development of automated complex to determine the composition of gaseous fuel during its combustion. Obtained with the their help the data, in turn, can be used for automatic operational setting device for changing the burner during the fuel combustion.

**1 ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО
УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ****Ключевые слова****Горючее переменного состава, состав горючего, состав продуктов сгорания, алгоритм решения.**

Высокая стоимость традиционных энергоносителей, обуславливает интерес к использованию вторичных горючих газов, имеющих гораздо более низкую стоимость. Их полномасштабная утилизация как путем сжигания с целью получения энергии, так и путем использования в качестве химического сырья, позволит не только уменьшить долю стоимости энергоносителей и сырья в стоимости конечной продукции, но и снизит вредные выбросы. Традиционные энергоносители позволяют легко обеспечить баланс между потребностями и производством энергии в технологических процессах. Расчеты реакций горения строятся на основе массовых соотношений. Построение же технологических процессов осуществляется с помощью более простых в исполнении объемных измерений. Такое возможно при известном и неизменном составе исходного сырья потому что существует однозначная взаимосвязь между массовыми и объемными величинами. Введение в оборот вторичных горючих газов в общем случае сдерживается из-за трудностей их эффективного использования вследствие переменного и неизвестного состава. Даже использование средств измерения массовых расходов не решают общей задачи. С одной стороны, при переменном но известном составе такие измерения позволяют реализовать эффективные процессы использования энергоносителей. С другой стороны, неопределенность изменения состава энергоносителя во времени исключает возможность использования отработанных, стандартных методов измерения.

Для вторичных энергоносителей разработано много способов мониторинга качества процессов их переработки с целью изменения расходов горючего и окислителя для организации оптимального окисления. При сжигании топлива для нагрева теплоносителя или производства пара необходимо обеспечить стехиометрическое соотношение горючего и окислителя. При сжигании же топлива в печах безокислительного нагрева или с целью получения синтез-газа процесс осуществляется с недостатком окислителя. При этом коэффициент соотношения горючего и окислителя строго регламентируется. Возможно, выделить два направления обеспечения оптимальности технологических процессов.

В первом направлении, стехиометрическое соотношение горючего и окислителя подразумевает экстремальность характеристик протекающих процессов. На этом и основаны методы мониторинга их оптимальности. В [1] разработан и запатентован регулятор для газопоршневых двигателей, работающих на рудничном газе. Использование такого газа сопровождается скачкообразным изменением его состава из действующих угольных разработок. Предложенная система фиксирует уменьшение мощности двигателя из-за изменения теплоты сгорания топлива и производит регулирование подачи горючего газа и воздуха. В [2] предложена корреляционно-экстремальная система управления процессами горения смеси газов в топке парового котла на основе текущих оценок КПД. Работа этой системы обеспечивает минимальные потери, что соответствует соотношению компонентов близкому к стехиометрическому.

Методы обеспечения оптимальности технологических процессов рассчитаны на применение в частных случаях или труднореализуемы на постоянной основе. Так регулятор *LEANOX*[®] работает с рудничным газом, представляющим собой смесь метана с воздухом. Постоянное длительное измерение температуры проблематично вследствие трудностей аппаратного обеспечения из-за высоких температур. И все они не позволяют определять состав горючего и его энтальпию, что важно для второго направления обеспечения оптимальности технологических процессов.

Во втором направлении строгая регламентация коэффициента избытка окислителя требует знания химического состава поступающего горючего и расчета необходимого количества известного окислителя. Определять состав горючего можно различными методами. Например, в рамках классической аналитической химии или с помощью различного рода газоанализаторов, так же возможно применение методов хроматографии.

В настоящее время наибольшее распространение получила хроматография. Хроматографический анализ это высокотехнологичный метод исследования с высокими требованиями к квалификации персонала и лабораторным условиям. Такие требования делают проблематичным использование хроматографии для производственных условий. В качестве примера можно рассмотреть определение с помощью метода газовой хроматографии состава природного газа [3]. Предполагается наличие в смеси 24 газов: водорода, гелия, кислорода, азота, диоксида углерода и углеводородов C1 - C8. Хроматограмма имеет продолжительность более 30 минут. Возможность такого характера изменения состава смеси газов можно проиллюстрировать с помощью данных, полученных на нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ). В течении суток были выполнены замеры изменения плотности вторичных газов, образующихся в процессе переработки нефти, в трех коллекторах с интервалом в 1 час (табл. 1). При этом известно, что смесь состояла из углеводородов C1-C5 с учетом возможных изомеров и водорода.



**1 ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО
УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ**

Таблица 1 – Экспериментальные данные плотности газов нефтепереработки

№ п/п	Технологический коллектор			№ п/п	Технологический коллектор		
	№1	№2	№3		№1	№2	№3
	ρ , кг/м ³	ρ , кг/м ³	ρ , кг/м ³		ρ , кг/м ³	ρ , кг/м ³	ρ , кг/м ³
1	1,693	0,639	0,625	13	1,852	0,876	0,633
2	1,180	0,912	0,715	14	1,852	0,876	0,633
3	1,635	0,501	0,518	15	1,694	0,562	0,628
4	1,635	0,501	0,518	16	1,667	0,637	0,458
5	1,635	0,501	0,518	17	1,500	0,773	0,725
6	1,635	0,501	0,518	18	1,840	0,822	0,805
7	1,750	0,504	0,500	19	1,817	0,830	0,714
8	1,641	0,637	0,431	20	1,817	0,830	0,714
9	1,580	0,836	0,599	21	1,731	0,647	1,019
10	1,759	0,604	0,437	22	1,831	1,069	1,367
11	1,818	0,705	0,476	23	1,831	1,069	1,367
12	1,801	0,694	0,633	24	1,831	1,069	1,367

Широкий разброс величин плотностей в коллекторах №№ 2 и 3 и быстрое их изменение указывает на соответствующее изменение количественного соотношения газов в смеси.

Известные методы обеспечения оптимальности использования вторичных энергоресурсов не позволяют в реализовать потенциал ресурсов. Это обусловлено либо узкой избирательностью некоторых методов по отношению к составу горючего, либо не оперативностью получения результатов анализа составляющих, а так же сложностью аналитических исследований.

Необходимо разработать метод, позволяющий определять энтальпию используемого вторичного энергоресурса в реальном времени. Измерительные приборы должны входить в перечень штатных. Необходимые данные для определения состава неизвестного горючего можно получить из его пробного сжигания и замеров технологических параметров: расходов горючего, воздуха, а так же соответствующей им температуры пламени. Горение в этом случае практически всегда будет происходить при коэффициенте избытка окислителя α отличающимся от 1. При известном составе горючего расчет таких процессов с определением температуры горения выполняется на основе уравнений химической термодинамики [4]. Назовем такую задачу прямой. В этом случае поставленную в данной работе задачу можно назвать обратной. Для ее решения используется модель, в основе которой лежит система уравнений из прямой задачи. Для изложения принятого подхода решения опишем модель прямой задачи.

На основании известного качественного и количественного состава веществ, входящих в горючее, рассчитывается его условная формула. На этом этапе происходит нивелирование представления состава горючего. Так в случае использования в качестве горючего метана и в случае использования смеси газов, образующихся при нефтепереработке (табл. 1), вид условной формулы горючего будет одинаков

$$C_{bC}H_{bH}, \quad (1)$$

но будет различаться количеством атомов: для метана $bC = 1; bH = 4$; для смеси газов оно вычисляется, исходя из их исходного состава. Изменение качественного состава горючих элементов смеси, например за счет наличия в ней спиртов, изменит вид условной формулы из-за появления кислорода:

$$C_{bC}H_{bH}O_{bO}. \quad (2)$$

Далее определяется условная формула топлива из расчета 1 моля горючего и некоторого количества молей окислителя, используемого в процессе горения. Это количество определяется соотношением

$$h = \alpha \cdot \chi_0, \quad (3)$$

где χ_0 - мольный стехиометрический коэффициент; α - коэффициент избытка окислителя.



**1 ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО
УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ**

Коэффициент χ_0 равен количеству молей окислителя, необходимых для организации стехиометрической реакции горения. Так соотношение составляющих при горении углеводородного горючего (1) в кислороде будет выглядеть следующим образом:

$$C_{bC}H_{bH} + \alpha \cdot \chi_0 \cdot O_2,$$

а условная формула топлива

$$C_{bC}H_{bH}O_{2\alpha\chi_0} \quad (4)$$

При использовании в качестве окислителя воздуха условная формула топлива строится аналогичным образом. Следует только учесть появление еще одного химического элемента – азота. Количество атомов кислорода и азота определяется при этом с учетом их мольных долей в составе воздуха.

Далее определяются вещества, которые могут образоваться в процессе горения – продукты сгорания (ПС). Их перечень обуславливается химическими элементами, входящими в условную формулу топлива. Так для (4) это могут быть:

$$CO_2, CO, H_2O, OH, O_2, H_2, C, H, O. \quad (5)$$

После этого на основе законов сохранения вещества и закона действующих масс строится система уравнений для определения количественного состава (концентраций) отдельных веществ в ПС. В силу того, что ПС находятся в газообразном состоянии, концентрации веществ могут быть выражены через их парциальные давления. Парциальные давления этих веществ выступают в качестве неизвестных.

В законе сохранения вещества учитывается равенство количества атомов соответствующего химического элемента в условной формуле топлива и в ПС. При этом количество соответствующих атомов в формуле топлива известно.

В законе действующих масс концентрации (парциальные давления) в соответствующих реакциях связаны через константы химического равновесия, которые, в свою очередь, зависят от температуры в реакционной зоне. Таким образом, появляется еще одна неизвестная величина – температура – и для замыкания системы требуется еще одно уравнение. Оно строится на основе закона сохранения энергии. Если горение происходит при адиабатных условиях, то энтальпия топлива равна сумме энтальпий веществ ПС (изоэнтальпийный процесс), величины которых зависят от температуры в реакционной зоне. С учетом того, что условная формула топлива строится из расчета 1 моля горючего, энтальпия топлива может быть определена из соотношения:

$$\dot{I}_T = \dot{I}_F + \alpha \cdot \chi_0 \cdot \dot{I}_O, \quad (6)$$

где \dot{I}_F - мольная энтальпия горючего; \dot{I}_O - мольная энтальпия окислителя.

Для решения прямой задачи используются качественный и количественный состав условной формулы топлива. Обязательно определен перечень веществ присутствующий в ПС и известные величины мольных энтальпий горючего и окислителя. Известные величины α и χ_0 . В ходе решения прямой задачи определяются парциальные давления ПС и температура их смеси.

Рассмотрим решение обратной задачи. При использовании горючего переменного состава количественное соотношение входящих в него элементов не определено, но перечень химических элементов из которых они состоят известен. Если говорить об условной формуле горючего, известен качественный ее состав. Состав воздуха известен, следовательно известен качественный состав условной формулы топлива и перечень веществ, которые могут присутствовать в ПС.

Будем рассматривать горючее и окислитель в газообразном состоянии. Так в качестве окислителя чаще всего используется воздух. Вторичные энергоресурсы образуются, как правило, также в виде газов. При пробном сжигании такого вида топлива могут быть замерены объемные расходы горючего (\dot{V}_F), окислителя (\dot{V}_O), а так же соответствующая им температура горения. Величины α , χ_0 , а следовательно и h (3), определяются относительно 1 моля горючего. При газообразных горючем и окислителе мольные расходы пропорциональны объемным. Следовательно, выражение (3) может быть записано в виде



**1 ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО
УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ**

$$h = \alpha \cdot \chi_0 = \dot{V}_O / \dot{V}_Г \quad (7)$$

и выполнена соответствующая замена в выражениях вида (4) и (6).

При решении прямой задачи энтальпия топлива, вычисляемая с помощью выражения (6) используется для определения температуры смеси ПС. При решении обратной задачи энтальпия окислителя известна и с учетом замены (7) в (6) неизвестной остается только энтальпия горючего, подлежащая определению. Зато определена температура ПС, соответствующая отношению (7), замеряемая при пробном сжигании топлива.

В ходе решения обратной задачи необходимо определить: парциальные давления ПС, количество атомов химических элементов в условной формуле горючего, энтальпию горючего.

Системы уравнений из алгоритма прямой задачи при известных величинах $\dot{V}_Г$ и \dot{V}_O и, следовательно, известной величине h (7) достаточно для определения парциальных давлений ПС и еще какой-то одной величины, например bC из (4), вместо измеренной температуры. Изменив расход окислителя (\dot{V}_O) при неизменном расходе горючего ($\dot{V}_Г$) и измерив соответствующую новому соотношению (7) температуру, можно получить еще один комплект уравнений. Их будет достаточно для определения парциальных давлений газов ПС при новой температуре и еще одной какой-то неизвестной величины, например bH . Повторив такую итерационную процедуру необходимое количество раз получим систему уравнений для определения всех неизвестных величин.

Для проверки предложенного алгоритма решения обратной задачи был проведен следующий анализ.

Во-первых, для отработки алгоритма было реализовано самостоятельное решение прямой задачи. Во вторых, для оценки учета основных факторов в модели и правильности реализации решения на ее основе были выполнены расчеты по горению метана, этана, этилена в воздушной атмосфере при различных α и результаты сравнены с результатами других авторов. В [5] приведены результаты расчетов из опубликованных источников по составу ПС и температуре в камере сгорания для различных α при сжигании смеси «метан + воздух». Сравнение с ними полученных результатов расчетов (табл. 2) показывает хорошее совпадение с относительным отклонением не превышающим 5%, что соответствует точности инженерных расчетов. Погрешности определялись только для веществ, парциальные давления которых составляют более 1% от общего давления смеси газов в камере сгорания.

Таблица 2 - Сравнение результатов расчета состава продуктов сгорания смеси «метан + воздух»

	$\alpha = 0,7$			$\alpha = 1,0$			$\alpha = 1,5$		
	[5]	расчет	$\epsilon, \%$	[5]	расчет	$\epsilon, \%$	[5]	расчет	$\epsilon, \%$
T, [K]	1958	1940	0,9	2239	2232	0,3	1782	1776	0,3
$P_{CO}, [\text{бар}]$	0,0771	0,0749	2,9	0,0078	0,0071		0,0	0,0	
$P_{CO_2}, [\text{бар}]$	0,0442	0,0479	7,7	0,0870	0,0871	0,1	0,0657	0,0652	0,8
$P_{H_2O}, [\text{бар}]$	0,1731	0,1694	2,18	0,1837	0,1836	0,05	0,1300	0,1303	0,2
$P_{OH}, [\text{бар}]$	0,0	0,0		0,0025	0,0025		0,0004	0,0004	
$P_{H_2}, [\text{бар}]$	0,0677	0,0697	2,9	0,0030	0,0033		0,0	0,0	
$P_{O_2}, [\text{бар}]$	0,0	0,0		0,0039	0,0038		0,0641	0,0642	0,15
$P_{N_2}, [\text{бар}]$	0,6301	0,6378	1,2	0,7016	0,7103	1,2	0,7288	0,7378	1,2
$P_{NO}, [\text{бар}]$	0,0	0,0		0,0018	0,00168		0,0022	0,00196	
$\sum P_i, [\text{бар}]$	0,9922	0,9997		0,9913	0,9994		0,9912	0,9999	



**1 ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО
УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ**

Для топливных пар «этан + воздух», «этилен + воздух» столь подробных опубликованных данных найдено не было. Поэтому адекватность полученных результатов величинам исследуемых процессов оценивалась на основании сравнения (табл. 3) рассчитанных адиабатических температур горения стехиометрических смесей метана, этана, этилена с воздухом и соответствующих известных данных [6]. Малые относительные отклонения говорят о хорошем их соответствии.

Таблица 3 - Сравнение адиабатических температур горения горючих газов в воздухе

	Расчет		[6]	ε, %
	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 1,0$	$\alpha = 1,0$	
	T, [K]	T, [K]	T, [K]	
метан	2233	2230	2210	0,9
этан	2270	2263	2247	0,7
этилен	2397	2379	2361	0,76

В [7], основанной на экспериментальных данных, отмечено, что максимальный брутто и нетто КПД котла при сжигании любых видов органического горючего может быть получен при некотором недожоге. Объяснено это уменьшением потерь тепла с уходящими газами и затрат тепла на собственные нужды. Используемый алгоритм позволяет учесть эту особенность. Выполнение расчетов с шагом изменения коэффициента избытка окислителя $\nabla\alpha = 0,05$ показало, что максимальная температура может быть достигнута при $\alpha = 0,95$ (табл. 3).

В третьих была решена прямая задача для смеси газов метан (80%) + этан (10%) + этилен (10%) для заданного их соотношении в смеси и при различных α . Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4 - Состав продуктов адиабатического горения смеси «метан + этан + этилен» в воздухе

	$\alpha = 0,7$	$\alpha = 1,0$	$\alpha = 1,5$
T, [K]	1984	2257	1799
$P_{CO}, [\text{бар}]$	0,079	0,0084	0
$P_{CO_2}, [\text{бар}]$	0,0508	0,0926	0,0699
$P_{H_2O}, [\text{бар}]$	0,16	0,1718	0,1221
$P_{OH}, [\text{бар}]$	0	0,0027	0
$P_{H_2}, [\text{бар}]$	0,0669	0,0034	0
$P_{O_2}, [\text{бар}]$	0	0,0043	0,0647
$P_{N_2}, [\text{бар}]$	0,6428	0,7141	0,7418
$P_{NO}, [\text{бар}]$	0	0,0019	0,0021
$\sum P_i, [\text{бар}]$	0,9995	0,9992	1,0

Адекватность результатов расчетов оценивалась косвенно путем сопоставления с данными, соответствующими горению составляющих смесь газов в воздухе по отдельности по температуре (табл. 3) и по составу при горении метана (табл. 2). Так наличие в смеси этана и этилена, имеющих большую температуру горения по сравнению с метаном, должно приводить к соответствующему увеличению температуры горения смеси. Кроме того, этан и этилен по сравнению с метаном имеют в своем составе большую долю углерода. Следовательно в ПС рассматриваемой газовой смеси по сравнению с метаном при соответствующих α должна расти доля CO и CO₂. Анализ результатов расчетов (табл. 4) показывает их соответствие сделанным выводам.

В четвертых, на основании результатов расчетов были сформированы исходные данные, имитирующие технологические замеры, для решения обратной задачи. Для различных α были выбраны соответствующие им

**1 ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ**

температуры ПС и определены отношения \dot{V}_O/\dot{V}_F (7). При реализации предлагаемого подхода определения состава смеси горючих газов на практике сжигание топлива может происходить при различных α . С целью проверки работоспособности алгоритма были сформированы три группы исходных данных, охватывающих различные диапазоны изменения α :

для $\alpha < 1$ $\alpha = 0,6; 0,7; 0,9$; для $\alpha > 1$ $\alpha = 1,2; 1,4; 1,6$; для $\alpha \sim 1$ $\alpha = 0,8; 1,0; 1,2$.

В пятых, с использованием сформированных исходных данных и отработанного в алгоритма получены решения обратной задачи – рассчитаны соответствующие составы горючих газов, их смеси, а так же соответствующие им энтальпии. На основании полученных результатов оценена возможность использования предложенного алгоритма для решения обратной задачи. Сравнение между собой рассчитанных, при решении обратной задачи, составов смеси газов для различных диапазонов изменения α показало их совпадение с отклонением в третьем-четвертом знаках. Соответствующие результаты получены и при сравнении с исходным составом смеси, используемой при решении прямой задачи. Это показывает работоспособность предложенного алгоритма и математической устойчивости решения. Отмеченные незначительные отклонения объясняются итерационным (приближенным) процессом решения нелинейной системы уравнений

На практике существует ряд факторов, препятствующих получению точного решения задачи определения состава сжигаемого газа не адиабатность (не изоэнтальпийность) рассматриваемого процесса горения и существование погрешности измерений при реальном определении расходов газов и температуры их горения.

Полученные результаты показывают математическую адекватность предложенного метода для определения состава смеси горючих газов в процессе их сжигания. При этом задача разрешима при минимальных *ограничениях* и *допущениях*. Принятые ограничения не являются жесткими, т.к. большинство вторичных энергоресурсов находятся в газообразном состоянии и перечень химических элементов, из которых они состоят, известен. Справедливость допущения может быть проверена в процессе вычислений. Применение предложенного метода позволяет рационально в энергетическом плане использовать вторичные энергоресурсы с одновременным удержанием на допустимом уровне вредных выбросов.

Литература

1. Сайт подразделения «GE Energy» компании General Electric [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.URL: http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/gas_engines_power_generation/gas_engines_jenbacher_type_2.jsp](http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/gas_engines_power_generation/gas_engines_jenbacher_type_2.jsp);
2. Казаринов Л.С. Способ экстремальной автоматической системы регулирования процессами горения в топке парового котла при использовании смеси газов [Текст] / Л.С.Казаринов, А.В. Кинаш : Материалы 67-й науч.-технич. конф., 2009 г. Магнитогорск/ ГОУ ВПО «МГТУ», Т.2. - С. 138 – 139.;
3. Межгосударственный стандарт ГОСТ 31371.6-2008 (ИСО 6974-6:2002) Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. Часть 6. Определение водорода, гелия, кислорода, азота, диоксида углерода и углеводородов C1 - C8 с использованием трех капиллярных колонок [Текст]. – Введ. 2010-01-01. М.: Стандартиформ, 2009.;
4. Дорофеев А.А. Основы теории тепловых ракетных двигателей. (Общая теория ракетных двигателей) [Электронный ресурс]/ А.А.Дорофеев. - М.: МГТУ им. Баумана, 1999. – Режим доступа: <http://www.engineer.bmstu.ru/res/dorofeev/MAIN.HTM>;
5. Брунеткин А.И. Идентификация количественного состава неизвестного газообразного горючего и его продуктов сгорания на основе измеренных технологических параметров процесса сжигания топлива. [Текст]/ А.И. Брунеткин, М.В. Максимов, А.В. Бондаренко// Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харьков: НТУ «ХПІ», 2014. – № 12(1055). – 194 с. – ISSN 2078-774X.;
6. <http://www.doc01.ru/rukovodstvo-2-1/14> Министерство российской федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. Федеральное государственное учреждение «ВО "Знак Почета" научно-исследовательский институт противопожарной обороны».;
7. Расчет основных показателей пожаро-взрывоопасности веществ и материалов. Руководство. 2002, 25 с.;
8. Росляков П.В., Ионкин И.Л., Плешанов К.А. Эффективное сжигание топлива с контролируемым химическим недожогом. Теплоэнергетика, М., 2009, №1, стр. 20-23.

**1 ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО
УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ****References**

1. Sayt podrazdeleniya «GE Energy» kompanii General Electric [Elektronnyiy resurs]. – Rezhim dostupa: [www.URL: http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/gas_engines_power_generation/gas_engines_jenbacher_type_2.jsp](http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/gas_engines_power_generation/gas_engines_jenbacher_type_2.jsp);
2. Kazarinov L.S. Sposob ekstremalnoy avtomaticheskoy sistemy regulirovaniya protsessami goreniya v topke parovogo kotla pri ispolzovanii smesi gazov [Tekst] / L.S.Kazarinov, A.V. Kinash : Materialyi 67-y nauch.-tehnich. konf., 2009 g. Magnitogorsk/ GOU VPO «MGU», T.2. - S. 138 – 139;
3. Mezhsudarstvennyiy standart GOST 31371.6-2008 (ISO 6974-6:2002) Gaz prirodnyiy. Opredelenie sostava metodom gazovoy hromatografii s otsenkoy neopredelennosti. Chast 6. Opredelenie vodoroda, geliya, kisloroda, azota, dioksida ugleroda i uglevodorodov S1 - S8 s ispolzovaniem treh kapillyarnykh kolonok [Tekst]. – Vved. 2010-01-01. M.: Standartinform, 2009.;
4. Dorofeev A.A. Osnovyi teorii teplovykh raketnykh dvigateley. (Obschaya teoriya raketnykh dvigateley) [Elektronnyiy resurs]/ A.A.Dorofeev. - M.: MGU im. Baumana, 1999. – Rezhim dostupa: <http://www.engineer.bmstu.ru/res/dorofeev/MAIN.HTM>;
5. Brunetkin A.I. Identifikatsiya kolichestvennogo sostava neizvestnogo gazoobraznogo goryuchego i ego produktov sgoraniya na osnove izmerennykh tehnologicheskikh parametrov protsessa szhiganiya topliva. [Tekst]/ A.I. Brunetkin, M.V. Maksimov, A.V. Bondarenko// Visnik Natsionalnogo tehnichnogo univrsitetu «HPI». Zbirk naukovih prats. Seriya: Energetichni ta teplotehnichni protsesi y ustakuvannya. – Harkov: NTU «HPI», 2014. – # 12(1055). – 194 s. – ISSN 2078-774X.;
6. <http://www.doc01.ru/rukovodstvo-2-1/14> Ministerstvo rossiyskoy federatsii po delam grazhdanskoy obrony, chrezvychaynym situatsiyam i likvidatsii posledstviy stihiynykh bedstviy. Federalnoe gosudarstvennoe uchrezhdenie «VO "Znak Pocheta" nauchno-issledovatel'skiy institut protivopozharnoy obrony».;
7. Raschet osnovnykh pokazateley pozharo-vzryivoopasnosti veschestv i materialov. Rukovodstvo. 2002, 25 s.;
8. Roslyakov P.V., Ionkin I.L., Pleshanov K.A. Effektivnoe szhiganie topliva s kontroliruemyim himicheskim nedozhogom. Teploenergetika, M., 2009, #1, str. 20-23.

УДК [004.4:621.86.067]-048.34

ПРОГРАМНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОТЛАДКИ ПРИКЛАДНОГО ПО АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАГРУЗКИ ПТЛ СЫПУЧИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Кирьязов И.Н.¹, Хобин В.А.²¹ООО «С-инжиниринг», г. Одесса²Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Copyright © 2014 by author and the journal “Automation technological and business - processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

DOI: 10.15673/2312-3125.20/2015.36955

Аннотация

Статья завершает публикации авторов, связанных с разработкой и применением математических моделей процессов перегрузки сыпучих материалов поточно-транспортными линиями (ПТЛ) как основы для разработки и подготовки к внедрению эффективных систем автоматического управления (САУ) их