

ТЕХНОЛОГІЇ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

УДК 662.611.2:662.613.5

**А.И. Брунеткин, канд. техн. наук, доц.,
М.В. Максимов, д-р техн. наук, проф.**

Государственное высшее учебное заведение „Одесский национальный политехнический университет“, г. Одесса, Украина, e-mail: prof.maksimov@gmail.com; alexbrun@rambler.ru

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА ГОРЮЧИХ ГАЗОВ ПРИ ИХ СЖИГАНИИ

**A.I. Brunetkin, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof,
M.V. Maksimov, Dr. Sci. (Tech.), Prof.**

State Higher Educational Institution “Odessa National Polytechnic University”, Odessa, Ukraine, e-mail: alexbrun@rambler.ru; prof.maksimov@gmail.com

THE METHOD FOR DETERMINATION OF A COMBUSTIBLE GASE COMPOSITION DURING ITS COMBUSTION

Цель. Создание метода, позволяющего определить переменный состав, а также энергосодержание (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.

Методика. На основе известной методики определения состава продуктов сгорания и их температуры при заданном составе топлива и его энтальпии (прямая задача) построено решение по определению состава топлива и его энтальпии (обратная задача) на основе технологических параметров (температуры продуктов сгорания, расходов горючего и окислителя), которые могут быть измерены в процессе горения.

Результаты. 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 были сравнены с известными величинами.

Научная новизна. Разработаны метод решения и алгоритм, позволяющие определять состав и энтальпию газообразного горючего в процессе его сжигания в воздухе. Показана устойчивость решения такой задачи. Путем решения прямой и обратной задач показана адекватность полученного результата исходным данным.

Практическая значимость. Предложенные методика и алгоритм могут служить основой для разработки автоматического комплекса по определению состава газообразного горючего в процессе его сжигания. Полученные с его помощью данные, в свою очередь, могут быть использованы для автоматической оперативной настройки горелочного устройства при изменении в процессе сжигания состава горючего.

Ключевые слова: *горючее переменного состава, состав горючего, состав продуктов сгорания*

Постановка проблемы. Высокая стоимость традиционных энергоносителей, выступающих, в том числе, и в качестве сырья для химической промышленности, обуславливает интерес к использованию вспомогательных (вторичных) горючих газов, имеющих гораздо более низкую стоимость или даже требующих вложения дополнительных средств для парирования их вредного воздействия на окружающую среду. Например:

– выносимых на поверхность вентиляционными и дегазационными системами угольных шахт (смесь метана с воздухом);

– образующихся при реализации некоторых технологических процессов (газы коксовых и доменных производств, газы нефтепереработки);

– образующихся при переработке отходов (газы со свалок, из метантенков, пиролизных установок) и т.д.

Их полномасштабная утилизация как путем сжигания с целью получения энергии, так и путем ис-

пользования в качестве химического сырья, позволит не только уменьшить долю стоимости энергоносителей и сырья в стоимости конечной продукции без вложения на начальном этапе значительных средств в технологии энергосбережения, но и уменьшит вредные выбросы или экономить средства, выделяемые на парирование их вредного влияния.

Выделение нерешенной проблемы. Определенность состава традиционных энергоносителей позволяет легко обеспечить баланс между потребностями и производством энергии в технологических процессах. При этом расчеты реакций горения и химической переработки строятся на основе массовых соотношений. Построение же технологических процессов осуществляется с помощью более простых в исполнении объемных измерений. Это возможно потому, что при известном и неизменном составе исходного сырья существует однозначная взаимосвязь между массовыми и объемными величинами. Введение в оборот вторичных горючих газов, в общем случае, сдерживается из-за трудностей эффективного их использования вследствие переменного и, к тому же, неизвестного в процессе поступления состава. Даже использование средств измерения массовых расходов не решает 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.

Анализ последних исследований. Широкий спектр разнообразных вторичных энергоносителей привел к разработке различных способов мониторинга качества процессов их переработки с целью коррекции расходов горючего и окислителя для организации оптимальных реакций.

Оптимальность может проявляться по-разному. Так, в случае сжигания топлива только в энергетических целях (нагрев теплоносителя, производство пара), необходимо обеспечить стехиометрическое (или близкое к нему) соотношение горючего и окислителя. При сжигании же топлива, например, в печах безокислительного нагрева или с целью получения синтез-газа процесс протекает при существенном недостатке окислителя. При этом коэффициент соотношения горючего и окислителя строго регламентируется. Отмеченные случаи не охватывают всех возможных вариантов использования вторичных энергоресурсов, но позволяют выделить два направления обеспечения оптимальности технологических процессов:

1. Стехиометрическое соотношение горючего и окислителя подразумевает экстремальность характеристик протекающих процессов. На этом и основаны методы мониторинга их оптимальности. Например:

– компанией *General Electric* разработан [1] и запатентован регулятор *LEANOX®* для газопоршневых двигателей, работающих на рудничном газе. Использование такого газа сопровождается скачкообразным изменением его состава из действующих угольных разработок. Предложенная система фиксирует уменьшение мощно-

сти 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, и, следовательно, максимальную температуру в топке;

– определение в дымовых газах наличия кислорода или угарного газа (недожог). Регулирование процесса горения может производиться путем изменения подачи воздуха. Соотношение горючего и окислителя, близкое к стехиометрическому, обеспечивает одновременную минимизацию как O_2 , так и CO ;

– прямое измерение температуры в топке. Регулирование процесса горения может производиться путем изменения подачи воздуха с помощью экстремального регулятора. Соотношению горючего и окислителя, близкому к стехиометрическому, соответствует максимальная температура. Следует подчеркнуть, что важно определить не величину температуры, а отметить ее максимум.

2. Строгая регламентация в ряде технологических процессов коэффициента избытка окислителя, существенно отличающегося от стехиометрического, требует знания химического состава поступающего горючего и расчета необходимого количества известного окислителя. Определение состава горючего может происходить различными методами. Например:

– в рамках классической аналитической химии;
– с помощью различного рода газоанализаторов;
– с помощью хроматографии, относящейся к аналитической химии.

Выделение нерешенной ранее части общей проблемы. Некоторые из методов первого направления обеспечения оптимальности технологических процессов рассчитаны на применение в частных случаях или трудно реализуемы 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 (> 2000 К). И все они не позволяют определять состав горючего и его энтальпию, что важно для второго направления обеспечения оптимальности технологических процессов.

Из приемов второго направления в настоящее время наибольшее распространение получила хроматография как наиболее точный и оперативный метод. Следует отметить, что хроматографический анализ – высокотехнологичный метод исследования с высокими требованиями к квалификации персонала и лабораторным условиям. Такие требования делают проблематичным использование хроматографии для круглосуточного мониторинга состава смеси газов в производственных условиях. Кроме того, оперативность хроматографии (впрочем, как и любого анализа) относительна. 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. Причем время зависит от количества газов в смеси. Состав определяется на момент начала исследования. Если соотношение веществ в смеси будет изменяться непредсказуемым образом и быстро (например, несколько раз в час), хроматографический анализ не обеспечит необходимой оперативности получения результатов. Возможность такого характера изменения состава смеси газов можно проиллюстрировать с помощью данных, полученных на Одесском нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ). В течение 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.

Таблица 1

Измеренные плотности газов нефтепереработки

Момент времени замера	Газовый технологический коллектор		
	№1 ρ, кг/м ³	№2 ρ, кг/м ³	№3 ρ, кг/м ³
1-00	1,693	0,639	0,625
2-00	1,180	0,912	0,715
3-00	1,635	0,501	0,518
4-00	1,635	0,501	0,518
5-00	1,635	0,501	0,518
6-00	1,635	0,501	0,518
7-00	1,750	0,504	0,500
8-00	1,641	0,637	0,431
9-00	1,580	0,836	0,599
10-00	1,759	0,604	0,437
11-00	1,818	0,705	0,476
12-00	1,801	0,694	0,633
13-00	1,852	0,876	0,633
14-00	1,852	0,876	0,633
15-00	1,694	0,562	0,628
16-00	1,667	0,637	0,458
17-00	1,500	0,773	0,725
18-00	1,840	0,822	0,805
19-00	1,817	0,830	0,714
20-00	1,817	0,830	0,714
21-00	1,731	0,647	1,019
22-00	1,831	1,069	1,367
23-00	1,831	1,069	1,367
24-00	1,831	1,069	1,367

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

Формулирование цели работы. Существующие методы обеспечения оптимальности использования вторичных энергоресурсов не позволяют в полной мере реализовать потенциал ресурсов. Это обусловлено либо узкой избирательностью некоторых методов по отношению к составу горючего, либо не оперативностью получения результатов анализа составляющих, а также сложностью аналитических исследований.

Необходим метод, позволяющий определять изменяющийся состав, а также энергосодержание (энтальпию) используемого вторичного энергоресурса со скоростью не зависящей, или мало зависящей, от количества компонентов, входящих в его состав. Чтобы избежать влияния квалификации обслуживающего персонала, анализ должен производиться в автоматическом режиме. Используемые измерительные приборы должны входить в перечень существующих штатных приборов. Это необходимо для того, чтобы их обслуживание, ремонт, замену мог осуществлять имеющийся персонал.

Изложение основного материала. Необходимые данные для определения состава неизвестного горючего можно получить из его пробного сжигания и замеров технологических параметров: расходов горючего, окислителя (воздуха), а также соответствующей им температуры пламени. Горение в этом случае практически всегда будет происходить при α (коэффициенте избытка окислителя) отличающемся от 1. При известном составе горючего, расчет таких процессов с определением температуры горения выполняется на основе уравнений химической термодинамики, которые многократно описаны, например в [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 кратко модель прямой задачи.

На основании известного качественного и количественного состава веществ, входящих в горючее, рассчитывается его условная формула. Она состоит из химических элементов, входящих в состав компонентов горючего (из их качественного состава). Число атомов соответствующих элементов определяется из количественного состава конкретного рассматриваемого горючего. 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

$$C_{bC}H_{bH} \tag{1}$$

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

$$C_{bC}H_{bH}O_{bO} \tag{2}$$

Но ни количество видов этих спиртов, ни появление в смеси, например, угарного (CO) или углекислого (CO₂) газов не приведет к изменению вида условной формулы горючего (2). Изменяются только значения величин bC, bH, bO .

Далее строится условная формула топлива из расчета 1 моля горючего и некоторого количества молей оки-

слителя, 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.

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

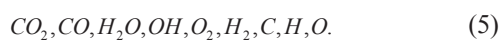
$$C_{bc}H_{bH} + \alpha \cdot \chi_0 \cdot O_2,$$

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



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

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

где \dot{I}_r – мольная энтальпия горючего; \dot{I}_O – мольная энтальпия окислителя.

Таким образом, при решении прямой задачи используются следующие исходные данные:

- 1) качественный (химические элементы) и количественный состав условной формулы топлива, подобный (4). При этом определен перечень веществ, подобный (5), которые могут присутствовать в ПС;
- 2) известные величины α и χ_0 ;
- 3) известные величины мольных энтальпий горючего и окислителя, а, следовательно, и всего топлива (6).

В ходе решения прямой задачи определяются:

- парциальные давления веществ ПС;
- температура смеси веществ ПС.

Рассмотрим решение обратной задачи. Для этого сравним имеющиеся исходные данные и данные для прямой задачи.

По пункту 1. При использовании горючего переменного состава количественное соотношение входящих в него элементов не определено, но перечень химических элементов, из которых они состоят, известен. Он определяется составом сырья, при переработке которого образовались вторичные горючие газы. Если говорить об условной формуле горючего, известен качественный ее состав. Так для смеси газов, образующихся при нефтепереработке на НПЗ и состоящих из углеводородов C1–C5, возможных из изомеров, а также водорода, условная формула будет состоять из двух элементов и иметь вид (1). Состав окислителя (как правило, воздуха) известен. Следовательно, известен качественный состав условной формулы топлива и перечень веществ, которые могут присутствовать в ПС.

По пункту 2. Будем рассматривать горючее и окислитель в газообразном состоянии. Это ограничение, но не очень жесткое. 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}_r), окислителя (\dot{V}_O), а также соответствующая им температура горения. Величины α , χ_0 , а следовательно и h (3), определяются относительно 1 моля горючего. При газообразном горючем и окислителе мольные расходы пропорциональны объемным. Следовательно, выражение (3) может быть записано в виде

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

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

По пункту 3. 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.

Рассмотрим алгоритм решения обратной задачи на основе имеющихся исходных данных и с использованием алгоритма решения прямой задачи. Количественный состав условной формулы горючего и его энтальпия неизвестны. По отношению к этим величинам примем допущение о том, что в процессе измерений и расчетов они остаются неизменными.

В ходе решения обратной задачи необходимо определить:

- парциальные давления веществ ПС (аналогично прямой задаче);

- количество атомов химических элементов в условной формуле горючего (bC, bH, \dots);

- энтальпию горючего (\dot{I}_r).

Системы уравнений из алгоритма прямой задачи при измеренных величинах \dot{V}_r 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 известной (измеренной) температуры. Изменив расход окислителя (\dot{V}_o) при неизменном расходе горючего (\dot{V}_r) и измерив соответствующую новому соотношению (7) температуру, можно получить еще один комплект уравнений. Их будет достаточно для определения парциальных давлений ПС при новой температуре и еще одной какой-то неизвестной величины, например bH . Повторив эту процедуру необходимое количество раз, получим систему уравнений для определения всех неизвестных величин: \dot{I}_r, bC, bH, \dots

Предложенный алгоритм также позволяет проверить справедливость допущения о неизменности на определенном временном интервале количественного состава и энтальпии горючего. Проиллюстрируем это на примере сжигания углеводородного горючего в кислороде. В процессе расчетов необходимо определить три величины: количество атомов углерода bC и водорода bH в условной формуле горючего (1), а также его энтальпию \dot{I}_r . Измерим (зададим) четыре различных величины \dot{V}_o при неизменном расходе \dot{V}_r и соответствующие им температуры пламени. Для определения неизвестных величин достаточно трех комплектов величин из замеренных четырех, например, с номерами 1–3. С их учетом и выполняются необходимые расчеты. После этого повторяется расчет, но уже с комплектами 2–4. Если изменения состава горючего за время замеров не произошло, то результаты расчетов в первом и втором случаях должны совпасть.

Уравнения моделей и подход к их решению как прямой, так и обратной задачи аналогичны. К настоящему моменту существует множество реализаций решения прямой задачи с помощью пакетов прикладных программ (ППП) как лицензионных (например, *Chemical Workbench*), так и находящихся в открытом доступе (например, *PROPER*). Но эти готовые реализации не предназначены и не могут быть применены для решения обратной задачи. В связи с этим был выбран следующий путь проверки возможности

использования предложенного алгоритма для решения обратной задачи:

a. с целью отработки алгоритма было реализовано самостоятельное решение прямой задачи;

b. для оценки полноты учета основных факторов в модели и правильности реализации решения на ее основе были выполнены расчеты по горению некоторых горючих газов (метан, этан, этилен) в воздухе при различных α , полученные результаты сравнены с результатами решения и данными других авторов;

c. дополнительно было выполнено решение прямой задачи для смеси газов „метан+этан+этилен“ для заданного их соотношения в смеси и при различных α . О корректности полученного решения можно судить только косвенно, на основании точности результатов из предыдущего пункта „b“;

d. на основании результатов расчетов (из „b“ и „c“) были сформированы исходные данные, имитирующие технологические замеры, для решения обратной задачи. Для различных α были выбраны соответствующие им температуры ПС и определены отношения \dot{V}_o/\dot{V}_r (7);

e. с использованием сформированных в „d“ исходных данных и отработанного в „a“ алгоритма получены решения обратной задачи – рассчитаны соответствующие составы горючих газов, их смеси, а также соответствующие им энтальпии. На основании полученных результатов оценка возможность использования предложенного алгоритма для решения обратной задачи.

Рассмотрим полученные результаты по некоторым пунктам.

По пункту b. В [5] приведены данные (результаты расчетов) из опубликованных источников по составу ПС (парциальные давления при давлении в камере сгорания 1 бар) 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.

Имеющиеся отклонения можно отнести на счет влияния нескольких факторов:

– энтальпии и энтропии ПС, используемых для расчета констант химического равновесия, определены с разной степенью точности. В отличие от [5], аппроксимация табличных значений соответствующих величин была выполнена полиномами отдельно для энтальпии и энтропии, что позволило повысить точность их вычислений;

– результаты, приведенные в [5], получены при учете наличия в составе воздуха, кроме кислорода и азота, примесей (аргона, углекислого газа и др.). В расчетах, результаты которых приведены в данной работе, в составе воздуха учитывалось наличие только кислорода и азота. Количество кислорода принято таким же, как и в [5]. Вместо примесей, являющихся инертными

составляющими в процессе горения, соответственно увеличено количество азота. Такое упрощение привело

к незначительному искажению результатов расчетов, зато упростило их получение и анализ.

Таблица 2

Сравнение результатов расчета состава продуктов сгорания смеси „метан + воздух“

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

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

В подавляющем большинстве работ обсуждается температура горения при стехиометрическом соотношении горючего и окислителя. На этом не акцентируется внимание, но подразумевается такая температура максимальной. 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).

На основании вышеприведенных сопоставлений можно сделать вывод о достаточно полном учете основных факторов в использованной модели и правильности реализации решения на ее основе.

По пункту с. Расчеты были выполнены для горения смеси газов „метан (80%) + этан (10%) + этилен (10%)“ (объемные доли) в воздухе. Некоторые 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
$P_{CO}, [\text{мг/м}^3]$	0,079	0,0084	0
$P_{CO_2}, [\text{мг/м}^3]$	0,0508	0,0926	0,0699
$P_{H_2O}, [\text{мг/м}^3]$	0,16	0,1718	0,1221
$P_{OH}, [\text{мг/м}^3]$	0	0,0027	0
$P_{H_2}, [\text{мг/м}^3]$	0,0669	0,0034	0
$P_{O_2}, [\text{мг/м}^3]$	0	0,0043	0,0647
$P_{N_2}, [\text{мг/м}^3]$	0,6428	0,7141	0,7418
$P_{NO}, [\text{мг/м}^3]$	0	0,0019	0,0021
$\sum P_i, [\text{мг/м}^3]$	0,9995	0,9992	1,0

Опубликованных данных ни по температуре горения, ни по составу ПС для смесей подобного состава найти не удалось. Поэтому адекватность результатов расчетов оценивалась косвенно путем сопоставления с данными, соответствующими горению составляющих смесь газов в воздухе по отдельности:

- по температуре (табл. 3);
- 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 CO_2 . Анализ результатов расчетов (табл. 4) показывает их соответствие сделанным выводам.

По пункту d. 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 $\alpha \sim 1$ $\alpha = 0,8; 1,0; 1,2$.

По пункту e. 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 говорит о работоспособности предложенного алгоритма и математической устойчивости решения. Отмеченные незначительные отклонения объясняются итерационным (приближенным) процессом решения нелинейной системы уравнений. При этом количество уравнений для обратной задачи существенно больше нежели для прямой.

На практике существует ряд факторов, препятствующих получению точного решения задачи определения состава сжигаемого газа:

- не адиабатность (не изохорность) рассматриваемого процесса горения;
- погрешности измерений при реальном определении расходов газов и температуры их горения.

В представленной работе не ставилась задача определения степени их влияния. Этот вопрос, а также разработка методов парирования воздействия отмеченных факторов, может служить основой дальнейших исследований.

Выводы и перспективы развития направления.

Полученные результаты показывают математическую адекватность предложенного метода для определения состава смеси горючих газов в процессе их сжигания. При этом задача разрешима при минимальных *ограничениях* (горючее и окислитель в газообразном состоянии; перечень химических элементов, из которых состоит горючее известен) и *допущениях* (состав смеси газов остается постоянным в процессе измерения технологических параметров: расходов и температуры в камере сгорания). 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 прове-

рена в процессе вычислений. Применение предложенного метода позволяет рационально в энергетическом плане использовать вторичные энергоресурсы с одновременным удержанием на допустимом уровне вредных выбросов.

Оценка влияния неточности измерения на практике технологических параметров на решение, а также разработка методов его парирования, может служить основой для дальнейших работ в этом направлении.

Список литературы / References

1. Сайт подразделения „GE Energy“ компании General Electric [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/gas_engines_power_generation/gas_engines_jenbacher_type_2.jsp

“GE Energy” Company General Electric, available at: 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: материалы 67-й науч.-технич. конф., 2009 г. Магнитогорск / Л.С.Казаринов, А.В. Кинаш // ГОУ ВПО „МГТУ“. – 2009. – Т.2. – С. 138–139.

Kazarinov, L.S. and Kinash, A.V. (2009), “Method extreme automatic combustion control systems in the furnace of the boiler using a mixture of gases”, *Proc. of the 67th Scientific and Tech. Conf.*, Magnitogorsk, 2009, Vol.2, pp. 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 – [Введ. 2010-01-01]. – М.: Стандартинформ, 2009.

Intergovernmental Standard GOST 31371.6-2008 (ISO 6974-6: 2002) Natural gas. (2009), Definition of the composition by gas chromatography with an estimate of uncertainty. Part 6: Determination of hydrogen, helium, oxygen, nitrogen, carbon dioxide and C1–C8 hydrocarbons using three capillary columns. Valid since January 1, 2010. Standartinform, Moscow, Russia.

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>

Dorofeev, A.A. (1999), *Osnovy teorii teplovykh raketnykh dvigateley* [Fundamentals of the Theory of Thermal Rocket Engines], Moscow, Russia, available at: <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 / Брунеткин А.И., Максимов М.В., Бондаренко А.В. // Вісник Національного технічного університету „ХПІ“. Збірник наукових праць. Серія: Енергетичні та тепло-

технічні процеси й устаткування. – Харків: НТУ „ХПІ“, 2014. – № 12(1055). – 194 с. – ISSN 2078-774X.

Brunetkin, A.I., Maksimov, M.V. and Bondarenko, A.V. (2014), “Identification and quantitative composition of an unknown gaseous fuel and its combustion products on the basis of measured process parameters combustion”, *Visnyk Natsionalnoho Technichnoho Universytetu “KhPI”*, no.12(1055), p. 194, ISSN 2078-774X.

6. Руководство по показателям пожаровзрывоопасности веществ и материалов [Электронный ресурс] // Министерство российской федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. Федеральное государственное учреждение „Всероссийский ордена „Знак Почета“ научно-исследовательский институт противопожарной обороны“. – М.: 2002. – 25 с. – Режим доступа: <http://www.doc01.ru/rukovodstvo-2-1/14>

Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters. Federal State Institution “All-Russian Research Institute for Fire Protection”, available at: <http://www.doc01.ru/rukovodstvo-2-1/14>

7. Росляков П.В. Эффективное сжигание топлива с контролируемым химическим недожогом / П.В. Росляков, И.Л. Ионкин, К.А. Плешанов // Теплоэнергетика. – М., 2009. – №1. – С. 20–23.

Roslyakov, P.V., Ionkin, I.L. and Pleshanov, K.A. (2009), “Efficient combustion with controlled chemical unburnt”, *Teploenergetika*, Moscow, no.1, pp. 20–23.

Мета. Створення методу, що дозволяє визначити змінний склад, а також енерговміст (ентальпію) газоподібного пального у процесі його спалювання. Час визначення складу має мало залежати від кількості компонентів, що входять до нього. Використовувані при цьому прилади повинні входити до штатного складу устаткування, що обслуговується.

Методика. На основі відомої методики визначення складу продуктів згорання та їх температури при заданому складі палива та його ентальпії (пряма задача) побудоване рішення щодо визначення складу палива та його ентальпії (зворотна задача) на основі технологічних параметрів (температури продуктів згорання й витрат пального та окислювача), що можуть бути виміряні у процесі горіння.

Результати. На підставі запропонованого методу розроблені модель і алгоритм розв'язання зворотної задачі. З метою перевірки їх працездатності вирішено ряд прямих завдань при спалюванні метану, етану, етилену та їх суміші в повітрі. Отримані результати порівняні з відомими даними по складу продуктів згорання й температурі. На їх основі, для вирішення зворотного завдання, сформовані вихідні дані, що імітують заміри технологічних параметрів. Виконане рішення зворотного завдання. Знайдений склад пального та його ентальпія були порівняні з відомими величинами.

Наукова новизна. Розроблено метод розв'язку та алгоритм, що дозволяють визначати склад і ентальпію газоподібного пального у процесі його спалювання в повітрі. Показана стійкість вирішення такого завдання.

Шляхом розв'язання прямої та зворотної задач показана адекватність отриманого результату вихідним даним.

Практична значимість. Запропоновані методика та алгоритм можуть служити основою для розробки автоматичного комплексу з визначення складу газоподібного пального у процесі його спалювання. Отримані за його допомогою дані, у свою чергу, можуть бути використані для автоматичної оперативної настройки пальникового пристрою при зміні у процесі спалювання складу пального.

Ключові слова: пальне змінного складу, склад пального, склад продуктів згорання

Purpose. 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.

Methodology. 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.

Findings. 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.

Originality. 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.

Practical value. 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.

Keywords: an alternating fuel composition, fuel composition, the composition of the combustion products, solution algorithm

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.А. Мокрицьким. Дата надходження рукопису 05.09.14.