

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 681.51

Супрунцова Ю.А.

Одесский национальный политехнический университет

Брунеткин А.И.

Одесский национальный политехнический университет

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА ГАЗООБРАЗНОГО ГОРЮЧЕГО

В статье рассмотрена возможность снижения энергоемкости производства как доли стоимости (а не количества для энергоэффективности) энергоресурсов в стоимости продукции, которая выпускается. Это возможно без повышения энергоэффективности и без сопутствующих значительных финансовых вложений. Речь идет об использовании альтернативных видов топлива. Исследована математическая модель расчета переменного состава газообразного горючего.

Ключевые слова: горючее переменного состава, состав горючего, состав продуктов сгорания, алгоритм решения.

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, из пиролизных установок) и т.д.

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 без вложения на начальном этапе значительных средств в технологии энергосбережения, но и уменьшит вредные выбросы или экономит средства, выделяемые на парирование их вредного влияния.

Анализ последних исследований и публикаций. 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 без окислительного 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 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 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, близкое 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.

Постановка задания. 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. Это необходимо для того, чтобы их обслуживание, ремонт, замену мог осуществлять имеющийся персонал

Изложение основного материала исследования. Для выяснения особенностей построения модели этот процесс будем осуществлять с привлечением примера сжигания спирта в воздухе. Запишем условные формулы горючего и окислителя. С учетом химической структуры этилового спирта его формула имеет вид: $C_2H_5(OH)$. Исходя из условий построения модели, нет необходимости учитывать структуру рассматриваемого вещества. В этом случае условная формула горючего имеет вид:



Здесь $b_c b_h b_o$ – количество соответствующих атомов в условной формуле горючего. Для этилового спирта:

$$b_c=2, b_h=6, b_o=1. \quad (2)$$

В качестве окислителя рассмотрим воздух. Его состав в объемных долях соответствует приблизительно: 21% – O_2 кислород, 78% – N_2 азот и 1% приходится на различные примеси в виде аргона, углекислого газа и других, в общем инертных, примесей. Все эти примеси не участвуют в процессе горения также, как и азот. В силу этого для упрощения расчетов все примеси представим в виде еще 1% – N_2 . В конечном итоге воздух в расчетах представляется исходя из состава: 21% – O_2 кислород, 79% – N_2 . Условная формула строится исходя из количества атомов, входящих, например, в структурную формулу. Поэтому перейдем от объемных к массовым долям. Примем атомные массы:

$$\mu_O=15.9994; \mu_N=14.0070. \quad (3)$$

В этом случае с учетом принятого процентного состава формула воздуха будет иметь вид:



Рассмотрим реакцию горения спирта в кислороде при их стехиометрическом соотношении:



Из (5) следует, что для стехиометрического сжигания одного моля спирта необходимо три моля кислорода. Другими словами, для пары спирт кислород мольный стехиометрический коэффициент имеет значение

$$\chi_0^O = 3 \quad (6)$$

С учетом же принятого состава окислителя в виде воздуха (4) мольный стехиометрический коэффициент реакции будет равен:

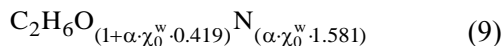
$$\chi_0^w = 14.32 \quad (7)$$

Реакции горения в энергетическом оборудовании идут не обязательно в стехиометрическом соотношении. Это учитывается введением коэффициента избытка окислителя и все соотношения реакций строятся с использованием мольного коэффициента соотношения компонентов:

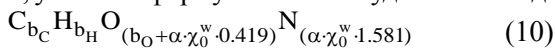
$$\chi^w = \alpha \cdot \chi_0^w \quad (8)$$

Коэффициента избытка окислителя показывает превышение мольного коэффициента соотношения компонентов над мольным стехиометрическим.

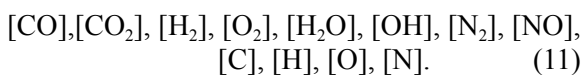
Расчет состава продуктов сгорания ведется на основе условной формулы топлива, включающей горючее и окислитель с учетом величины α . Так для этилового спирта с учетом (1), (2), (4), (7) и (8) эта формула будет иметь вид:



В общем виде для произвольного углеводородного кислородсодержащего горючего, сжигаемого в воздухе, условная формула топлива будет иметь вид:



Запишем перечень веществ и ионов, которые могут образоваться в процессе горения такого топлива:



Определение состава продуктов сгорания заключается в нахождении количественного соотношения газов из этого перечня. Количество неизвестных в модели определяется перечнем веществ в (11).

При варьировании коэффициента избытка окислителя α будет меняться количество и состав образующихся веществ. Например, при $\alpha < 1$, т.е. при нехватке окислителя, в смеси может отсутствовать $[O_2]$ и присутствовать $[CO]$ и $[H_2]$. В противоположность этому при $\alpha > 1$ появляются $[O_2]$ и $[no]$, но исчезают $[CO]$ и $[H_2]$. В состав продуктов сгорания могут входить и другие вещества более сложного состава, но при любой величине α их количество будет исчезающе мало. Поэтому в рас-

четах они не принимаются во внимание. Таким образом в (11) приведен перечень веществ, охватывающий практически важные случаи.

Рассмотрим уравнения химического равновесия для веществ из списка (11). Их перечень приведен в таблице

Таблица

Основные реакции образования зависимых веществ

1	$CO \leftrightarrow C + O$	4	$OH \leftrightarrow H + O$	7	$N_2 \leftrightarrow 2H$
2	$CO_2 \leftrightarrow C + 2O$	5	$H_2 \leftrightarrow 2H$	8	$NO \leftrightarrow N + O$
3	$H_2O \leftrightarrow 2H + O$	6	$O_2 \leftrightarrow 2O$		

Для уравнений, приведенные в таблице, можно записать закон действующих масс, который представляет собой отношение концентрации веществ соответствующих реакций, являющийся константой химического равновесия. Так, например, для второго уравнения из таблицы выражение закона будет иметь вид:

$$\frac{c(C) \cdot c^2(O)}{c(CO_2)} = K_{CO_2}(T). \quad (12)$$

Здесь $c(C)$, $c(O)$, $c(CO_2)$ – мольные концентрации соответственно углерода, кислорода и углекислого газа, $K_{CO_2}(T)$ – константа химического равновесия образования углекислого газа при некоторой температуре T . Показатель степени определяется коэффициентом при соответствующем химическом элементе. Уравнения вида (12), записанные для веществ из таблицы являются частью разрабатываемой модели.

Удобнее состав смеси газов определять не через концентрации, а через их парциальные давления. Уравнения вида (12) можно выразить и через эти величины. Мольные концентрации продуктов сгорания определяются по отношению, например, к одному молю топлива на основании выражения (10). Для замены концентраций на парциальные давления дополнительно к ним введем еще одну переменную M_T – количество рассматриваемых молей топлива. Ее величину будем не выбирать, а определять в процессе расчетов таким образом, чтобы величины парциальных давлений продуктов сгорания численно были равны их концентрациям. Таким образом всего модель включает 13 неизвестных величин: 12 парциальных давлений газов (11) в продуктах сгорания и число молей M_T рассматриваемого количества топлива.

Первые 8 уравнений запишем, выражая через парциальные давления продуктов сгорания закон действующих масс для реакций из Таблицы:

$$\frac{P_C \cdot P_O}{P_{CO}} = K_{CO}(T) \quad (12) \quad \frac{P_C \cdot P_O^2}{P_{CO_2}} = K_{CO_2}(T) \quad (13) \quad \frac{P_H^2 \cdot P_O}{P_{H_2O}} = K_{H_2O}(T) \quad (14)$$

$$\frac{P_H \cdot P_O}{P_{OH}} = K_{OH}(T) \quad (15) \quad \frac{P_H^2}{P_{H_2}} = K_{H_2}(T); \quad (16) \quad \frac{P_O^2}{P_{O_2}} = K_{O_2}(T) \quad (17)$$

$$\frac{P_N^2}{P_{N_2}} = K_{N_2}(T) \quad (18) \quad \frac{P_N \cdot P_O}{P_{NO}} = K_{NO}(T) \quad (19)$$

Константы химического равновесия табулированы в соответствующих справочниках и в расчетах для соответствующей температуры могут быть выбраны или рассчитаны с помощью аппроксимационных полиномов. Кроме того, они могут быть рассчитаны на основе энтальпий образования и энтропий веществ, входящих в рассматриваемые реакции, которые, в свою очередь, также табулированы или могут быть рассчитаны на основе аппроксимационных полиномов.

Следующие 4 уравнения запишем, выражая закон сохранения вещества в виде равенства количества атомов соответствующего химического элемента в топливе и продуктах сгорания. Воспользуемся тем, что в рассматриваемом случае парциальные давления газов в продуктах сгорания численно равны их концентрациям. Количество атомов в топливе берем на основании выражения (10) с учетом количества рассматриваемых его молекул :

$$\text{для [C]} \quad b_C \cdot M_T = P_{CO} + P_{CO_2} + P_C; \quad (21)$$

$$\text{для [H]} \quad b_H \cdot M_T = 2 \cdot P_{H_2O} + P_{OH} + 2 \cdot P_{H_2} + P_H; \quad (22)$$

$$\text{для [O]} \quad (b_O + \alpha \cdot \chi_0^w \cdot 0.419) \cdot M_T = P_{CO} + 2 \cdot P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{OH} + 2 \cdot P_{O_2} + P_{NO} + P_O; \quad (23)$$

$$\text{для [N]} \quad (\alpha \cdot \chi_0^w \cdot 1.581) \cdot M_T = 2 \cdot P_{N_2} + P_{NO} + P_N. \quad (24)$$

Для замыкания системы в качестве последнего уравнения запишем закон Дальтона, выражающий равенство суммы парциальных давлений продуктов сгорания давлению в камере сгорания (топке) P_Σ :

$$P_\Sigma = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{OH} + P_{H_2} + P_{O_2} + P_{N_2} + P_{NO} + P_C + P_H + P_O + P_N. \quad (25)$$

Модель представляет собой систему нелинейных алгебраических уравнений и в процессе ее решения требует линеаризации. Для уменьшения разницы между обусловленными парциальными давлениями (она может достигать 10-15 порядков) и, соответственно, до уменьшения погрешности и увеличения стойкости решения, все уравнения выходной системы логарифмируются. Это приводит к тому, что члены модифицированной системы остаются нелинейными, но будут отличаться между собой не больше, чем в 10-15 раз.

При линеаризации, которая проводится обычным образом, с использованием в качестве

аргументов величин (парциальных давлений продуктов сгорания), поправки будут определяться для них. Следовательно, они будут отличаться между собой на те же 10-15 раз. Чтобы избежать этого, в качестве аргументов при дифференцировании используют логарифмы искомым аргументов (парциальных давлений и величин). Члены уравнений являются логарифмами любых функций. Все уравнения имеют вид: $\sum_i \{ \ln[f(x_i)] \}$

В связи с этим для выполнения линеаризации необходимо найти производную вида:

$$d \sum_i \{ \ln[f(x_i)] \} / d[\ln(x_i)] = \sum_i d \{ \ln[f(x_i)] \} / d[\ln(x_i)].$$

Особенностью системы после логарифмирования является линейный характер функции $f(x_i)$. По этой причине форма производной будет иметь вид:

$$d[\ln(k \cdot x + a)] / d[\ln(x)],$$

где k, a – постоянная. В итоге:

$$d[\ln(k \cdot x + a)] / d[\ln(x)] = k \cdot x / (k \cdot x + a). \quad (26)$$

Для упрощения записи модели в дальнейшем выражение $\Delta[\ln(P_O)]$ будет представляться как Δ_O , а, например, $\Delta[\ln(P_{CO_2})]$ как Δ_{CO_2} .

После линеаризации с учетом (2) модель в отклонениях имеет вид:

$$1 \cdot \Delta_C + 1 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{CO} = (-1) \cdot \{ \ln(P_C) + \ln(P_O) - \ln(P_{CO}) - \ln[K_{CO}(T)] \}^*, \quad (27)$$

$$1 \cdot \Delta_C + 2 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{CO_2} = (-1) \cdot \{ \ln(P_C) + 2 \cdot \ln(P_O) - \ln(P_{CO_2}) - \ln[K_{CO_2}(T)] \}^*, \quad (28)$$

$$2 \cdot \Delta_H + 1 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{H_2O} = (-1) \cdot \{ 2 \cdot \ln(P_H) + \ln(P_O) - \ln(P_{H_2O}) - \ln[K_{H_2O}(T)] \}^*, \quad (29)$$

$$1 \cdot \Delta_H + 1 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{OH} = (-1) \cdot \{ \ln(P_H) + \ln(P_O) - \ln(P_{OH}) - \ln[K_{OH}(T)] \}^*, \quad (30)$$

$$2 \cdot \Delta_H - 1 \cdot \Delta_{H_2} = (-1) \cdot \{ 2 \cdot \ln(P_H) - \ln(P_{H_2}) - \ln[K_{H_2}(T)] \}^*, \quad (31)$$

$$2 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{O_2} = (-1) \cdot \{ 2 \cdot \ln(P_O) - \ln(P_{O_2}) - \ln[K_{O_2}(T)] \}^*, \quad (32)$$

$$2 \cdot \Delta_N - 1 \cdot \Delta_{N_2} = (-1) \cdot \{ 2 \cdot \ln(P_N) - \ln(P_{N_2}) - \ln[K_{N_2}(T)] \}^*, \quad (33)$$

$$1 \cdot \Delta_N + 1 \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{NO} = (-1) \cdot \{ \ln(P_N) + \ln(P_O) - \ln(P_{NO}) - \ln[K_{NO}(T)] \}^*, \quad (34)$$

$$\text{для [C]} \quad \frac{P_{CO}}{A} \Delta_{CO} + \frac{P_{CO_2}}{A} \Delta_{CO_2} + \frac{P_C}{A} \Delta_C - 1 \cdot \Delta_{M_T} = (-1) \cdot [\ln(A) - \ln(M_T) - \ln(b_C)]^*, \quad (35)$$

где $A = P_{CO} + P_{CO_2} + P_C$;

$$\frac{2 \cdot P_{H_2O}}{B} \cdot \Delta_{H_2O} + \frac{P_{OH}}{B} \cdot \Delta_{OH} + \frac{2 \cdot P_{H_2}}{B} \cdot \Delta_{H_2}$$

$$\text{для [H]} \quad \Delta_{H_2} + \frac{P_H}{B} \cdot \Delta_H - 1 \cdot \Delta_{M_T} = (-1) \cdot [\ln(B) - \ln(M_T) - \ln(b_H)]^*, \quad (36)$$

где $B = 2 \cdot P_{H_2O} + P_{OH} + 2 \cdot P_{H_2} + P_H$;

$$\begin{aligned} & \frac{P_{CO}}{B} \cdot \Delta_{CO} + \frac{2 \cdot P_{CO_2}}{B} \cdot \Delta_{CO_2} + \frac{P_{H_2O}}{B} \cdot \Delta_{H_2O} + \\ \text{для [O]} & + \frac{P_{OH}}{B} \cdot \Delta_{OH} + \frac{2 \cdot P_{O_2}}{B} \cdot \Delta_{O_2} + \\ & + \frac{P_{NO}}{B} \cdot \Delta_{NO} + \frac{P_O}{B} \cdot \Delta_O - 1 \cdot \Delta_{M_T} = \end{aligned} \quad (37)$$

где $B = P_{CO} + 2 \cdot P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{OH} + 2 \cdot P_{O_2} + P_{NO} + P_O$;

$$\begin{aligned} & \frac{P_{H_2}}{B} \cdot \Delta_{H_2} \cdot \frac{P_{N_2}}{G} \cdot \Delta_{N_2} + \frac{P_{NO}}{G} \cdot \Delta_{NO} + \\ \text{для [N]} & + \frac{P_N}{G} \cdot \Delta_N - 1 \cdot \Delta_{M_T} = \end{aligned} \quad (38)$$

$$= (-1) \cdot [\ln(G) - \ln(M_T) - \ln(\alpha \cdot \chi_0^w)]$$

где $G = 2 \cdot P_{N_2} + P_{NO} + P_N$;

$$\begin{aligned} & \frac{P_{CO}}{D} \cdot \Delta_{CO} + \frac{P_{CO_2}}{D} \cdot \Delta_{CO_2} + \frac{P_{H_2O}}{D} \cdot \Delta_{H_2O} + \\ \text{для [P\Sigma]} & + \frac{P_{OH}}{D} \cdot \Delta_{OH} + \frac{P_{H_2}}{D} \cdot \Delta_{H_2} + \frac{P_{O_2}}{D} \cdot \Delta_{O_2} + \frac{P_{O_3}}{D} \cdot \Delta_{O_3} + \\ & + \frac{P_{N_2}}{D} \cdot \Delta_{N_2} + \frac{P_{NO}}{D} \cdot \Delta_{NO} + \frac{P_C}{D} \cdot \Delta_C + \frac{P_H}{D} \cdot \Delta_H + \\ & + \frac{P_O}{D} \cdot \Delta_O + \frac{P_N}{D} \cdot \Delta_N = (-1) \cdot [\ln(D) - \ln(P_\Sigma)] \end{aligned} \quad (39)$$

где $D = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{OH} + P_{H_2} + P_{O_2} + P_{N_2} + P_{NO} + P_C + P_H + P_O + P_N$.

В приведенных выше уравнениях часть, указанная верхним индексом (*), относится к начальному приближению.

В записанной выше линеаризованной модели (27-33) выражается закон действующих. Уравнения (28-37) отображают закон сохранения жидкости. В виде уравнения (29) записан закон Дальтона.

Особенностью предложенной модели является замена мольного коэффициента соотношения компонентов $\chi^w = \alpha \cdot \chi_0^w$. Для его использования необходимы знания двух величин, которые могут быть определены только при знании состава топлива

и окислителя (воздуха). Предлагается изменить его на величину измеряемого технологического параметра – отношение объемных расходов окислителя и топлива. Такая замена справедлива для газообразных компонентов потому, что мольные объемы любых газов – одинаковые. Тогда отношение объемных расходов окислителя и топлива соответствует мольному соотношению компонентов даже для газов неизвестного состава.

Решение строится на предположении про изохорность процесса в камере сгорания (топке) энергетического оборудования. Для выбранной пары топливо-окислитель с известными для них энтальпиями $I^{(T)}$ и $I^{(O)}$ и заданной величины χ^w мольного коэффициента соотношения компонентов вычисляется энтальпия топлива $I^{(T)} = I^{(T)} + \chi^w \cdot I^{(O)}$.

Выводы. При разработке и доведении до практической реализации в виде программного обеспечения модели определения на основе измеряемых технологических параметров в виде объемных расходов горючего и воздуха, а также температуры пламени, произвольного переменного состава газообразного горючего в процессе его горения в специальном устройстве в режиме реального времени.

На основе уравнений химической кинетики, а также законов сохранения материального баланса предложена математическая модель определения переменного состава газообразного топлива в модельном представлении его условной формулы, которая позволяет за счет использования измеренных расходов и температуры пламени в процессе сжигания в специальном устройстве горючего в воздухе, определять состав условной формулы газообразного топлива и его теплотворной способности и дает возможность организовать процесс эффективного управления процессом сжигания топлива переменного состава.

Список литературы:

1. Сайт подразделения «GE Energy» компании General Electric. URL: http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/gas_engines_power_generation/gas_engines_jenbacher_type_2.jsp
2. Казаринов Л.С., Кинаш А.В. Способ экстремальной автоматической системы регулирования процессами горения в топке парового котла при использовании смеси газов. Материалы 67-й научно-технической конференции: ГОУ ВПО «МГТУ». Магнитогорск 2009 г. 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. Москва, 2009.
4. Дорофеев. А.А. Основы теории тепловых ракетных двигателей. (Общая теория ракетных двигателей). Москва, МГТУ им. Баумана, 1999. URL: <http://www.engineer.bmstu.ru/res/dorofeev/MAIN.HTM>
5. Брунеткин А.И., Максимов М.В., Бондаре А.В. Идентификация количественного состава неизвестного газообразного горючего и его продуктов сгорания на основе измеренных технологических параме-

тров процесса сжигания топлива. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків, НТУ «ХПІ», 2014. № 12(1055). 194 с.

6. Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов. Руководство. 2002, 25 с. URL: <http://www.doc01.ru/rukovodstvo-2-1/14>

7. Росляков П.В., Ионкин И.Л., Плешанов К.А. Эффективное сжигание топлива с контролируемым химическим недожогом. Теплоэнергетика. Москва, 2009, №1, стр. 20-23.

МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ЗМІННОГО СКЛАДУ ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛЬНОГО

У статті розглянуто можливість зниження енергоємності виробництва як частини вартості (а не кількості для енергоефективності) енергоресурсів у вартості продукції, яка випускається. Це можливо без підвищення енергоефективності і без супутніх значних фінансових вкладень. Йдеться про використання альтернативних видів палива. Досліджено математичну модель розрахунку змінного складу газоподібного палива.

Ключові слова: пальне змінного складу, склад пального, склад продуктів згоряння, алгоритм вирішення.

MODEL OF CALCULATION OF THE CHANGING COMPOSITION OF GASEOUS BURIAL

The article considers the possibility of reducing the energy intensity of production as a fraction of the cost (rather than the amount for energy efficiency) of energy resources in the cost of production, which is produced. This is possible without increasing energy efficiency and without significant financial investments. It is about using alternative fuels. The mathematical model of calculation of variable composition of gaseous fuel is studied.

Key words: fuel of variable composition, composition of fuel, composition of combustion products, algorithm of solution.