

В настоящее время ведется работа по разработке метода расчета временных характеристик исследуемой СМО. Далее станет возможен расчет сети массового обслуживания с узлами типа $M/G/n-G$ и ограничением полного времени пребывания заявки в ней.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю профессору Юрию Ивановичу Рыжикову за ряд ценных рекомендаций при написании данной статьи.

Литература

1. Башарин, Г.П. Анализ очередей в вычислительных системах / Г.П. Башарин, П.П. Бочаров, Я.А. Коган. – М., 1989.
2. Бочаров, П.П. Теория массового обслуживания: Учебник / П.П. Бочаров, А.В. Печинкин. – М., 1995.
3. Дудин, С.А. Модель функционирования колл-центра как система $MAP/PH/N/R-N$ с нетерпеливыми запросами / С.А. Дудин, О.С. Дудина // Проблемы передачи информации. – 2011. – № 47. – С. 68 – 83. – doi: 10.1134/S0032946011040053.
4. Рыжиков, Ю.И. Имитационное моделирование систем с «нетерпеливыми» заявками / Ю.И. Рыжиков, А.В. Уланов // Имитационное моделирование. Теория и практи-

ка: тр. VI Всероссийской конференции. – Казань, 2013. – С. 339 – 342.

5. Рыжиков, Ю.И. Итеративный метод расчета многоканальных систем с произвольным распределением времени обслуживания / Ю.И. Рыжиков, А.Д. Хомоненко // Проблемы управления и теории информации. – 1980. – № 3. – С. 203 – 213.

6. Рыжиков, Ю.И. Опыт расчета сложных систем массового обслуживания / Ю.И. Рыжиков, А.В. Уланов // Информационно-управляющие системы. – 2009. – № 2. – С. 56 – 62.

7. Hoshi, K. Traffic Performance for a Time-Out Scheme Communication System / K. Hoshi, S. Iijima, Y. Takahashi, N. Komatsu // Proc. International Conference on Ultra Modern Communications “ICUMT’2009”. – St. Petersburg. – 2009. – P. 1 – 6. – doi: 10.1109/ICUMT.2009.5345457.

8. Roubos, A. Call Centers with Hyperexponential Patience Modeling / A. Roubos, O. Jouini // International Journal of Production Economics. – 2013. – V. 141. – P. 307 – 315. – doi: 10.1016/j.ijpe.2012.08.011.

9. Takahashi, Y. Numerical Method for the Steady-State Probabilities of a GI/G/c Queuing System in General Class / Y. Takahashi, Y.A. Takami // Journal of the Operations Research Society of Japan. – 1976. – V. 19. – № 2. – P. 147 – 155.

УДК 621.778.04

Р.А. Юдин, Н.И. Шестаков, И.Р. Юдин, Н.А. Тувалин

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДВУХСТАДИЙНОГО СЖИГАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

В статье представлены результаты разработки алгоритма расчета неполного сгорания природного газа, позволяющего рассчитать химический состав продуктов неполного сгорания и температур, развиваемых при горении, при различных режимных параметрах. В алгоритме использованы зависимости константы термодинамического равновесия реакции водяного пара от стехиометрических объемов продуктов полного сгорания. В статье также приведены возможности по улучшению автоматического регулирования температуры в зонах печей при двухстадийном сжигании природного газа.

Оксид и диоксид углерода, водород и водяные пары, коэффициент расхода первичного воздуха, константа термодинамического равновесия, инерционность, автоматическое регулирование.

The article presents the results of the algorithm for calculating the incomplete combustion of natural gas, which allows calculating the chemical composition of the products of incomplete combustion and temperatures developed by combustion, at various regime parameters. The algorithm used the dependence of thermodynamic equilibrium constant of the reaction of water vapor from the stoichiometric amounts of products of complete combustion. The article also provides opportunities to improve the automatic temperature control in furnace at two-stage burning of natural gas.

Oxide and carbon dioxide, hydrogen and water vapor flow rate of primary air, constant of thermodynamic equilibrium, inertia, automatic regulation.

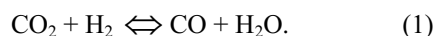
В черной металлургии и машиностроении при термохимической обработке стали широко используют открытый малоокислительный нагрев, применяя двухстадийное сжигание природного газа в печах с последовательными и параллельными зонами сжигания и дожига. Окончательную термообработку проводят в атмосфере продуктов неполного сгорания природного газа, а предварительную – в атмосфере продуктов их дожига, что гарантиро-

ванно обеспечивает малоокислительный нагрев металлопродукции.

Расчет дожига продуктов неполного сгорания, при котором обеспечивается полнота сгорания топлива при минимальных избытках воздуха, не представляет трудностей. Для получения итоговых химических реакций полного сгорания любого вида топлива достаточно ограничиться прямым уравниванием начальных и конечных элементов горения в

левой и правой частях уравнений этих реакций. При неполном сгорании топлива такой подход неприемлем, так как химический состав продуктов неполного сгорания во многом зависит от термодинамических особенностей процессов горения, поэтому его необходимо рассчитывать с их учетом.

Так, до последнего времени при расчетах химического состава продуктов неполного сгорания топлива использовали методику В.Ф. Копытова [2], основанную на принципе термодинамического равновесия компонентов продуктов неполного сгорания по обратимой физико-химической реакции, иногда именуемой реакцией водяного пара:



Константа термодинамического равновесия этой реакции является табулированной величиной, значения которой в зависимости от температуры определяют по формуле:

$$k = \frac{x_{\text{CO}_2} \cdot u_{\text{H}_2}}{y_{\text{CO}} \cdot z_{\text{H}_2\text{O}}} = f(t), \quad (2)$$

где означенные неизвестные являются объемами указанных компонентов продуктов неполного сгорания топлива.

По методике В.Ф. Копытова для определения химического состава продуктов неполного сгорания составляют материальный баланс химических элементов, участвующих в реакции (1). Первоначально составляют систему, состоящую из трех линейных алгебраических уравнений, соответственно для углерода, водорода и кислорода. В левой части каждого из этих уравнений записывают количество данного элемента в продуктах неполного сгорания, а в правой – в исходном топливе и воздухе, подаваемом на горение, при различных коэффициентах расхода первичного воздуха α_1 .

Четвертым уравнением этой системы является формула (2), при подстановке в которую трех неизвестных образуется квадратное уравнение, которое следует решать относительно одного из компонентов реакции (1).

В монографиях [1], [3] показано, что рассматриваемую систему уравнений можно решить относительно одного из неизвестных компонентов, используя в правой части уравнений вместо элементов исходного топлива, стехиометрические параметры его продуктов сгорания. Полученное в [3] решение для газа произвольного химического состава имеет следующий вид:

$$k = \frac{(\text{CO}_{2\text{max}} + \text{CO}_2 - y_{\text{CO}})}{y_{\text{CO}}[\alpha_1(2\text{CO}_{2\text{max}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{max}}) - 2\text{CO}_{2\text{max}} + \alpha_1(2\text{SO}_2 - \text{CO}) - 2\text{O}_2 + y_{\text{CO}}]} \times \\ \times [(1 - \alpha_1)(2\text{CO}_{2\text{max}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{max}}) - \alpha_1(2\text{SO}_2 - \text{CO}) + 2\text{O}_2 - y_{\text{CO}}]. \quad (3)$$

Здесь $\text{CO}_{2\text{max}}$ и $\text{H}_2\text{O}_{\text{max}}$ – максимальные объемы диоксида углерода и водяных паров в продуктах сгорания, соответствующие стехиометрическим условиям горения; CO , CO_2 – объемы оксида и диоксида углерода в топливе; SO_2 – объем сернистого газа в продуктах сгорания, равный объему сероводорода (H_2S) в топливе; α_1 – коэффициент расхода первичного воздуха. Для топлива, содержащего только углеводородные горючие газы и негорючие компоненты, формула (3) имеет более компактный вид:

$$k = \frac{(\text{CO}_{2\text{max}} + \text{CO}_2 - y_{\text{CO}}) \cdot [(1 - \alpha_1) \cdot (2\text{CO}_{2\text{max}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{max}}) - y_{\text{CO}}]}{y_{\text{CO}}[\alpha_1(2\text{CO}_{2\text{max}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{max}}) - 2\text{CO}_{2\text{max}} + y_{\text{CO}}]} \quad (3.1)$$

Для метана $\text{CO}_{2\text{max}} = 1$, $\text{H}_2\text{O}_{\text{max}} = 2$, поэтому:

$$k = \frac{(1 - y_{\text{CO}}) \cdot [4(1 - \alpha_1) - y_{\text{CO}}]}{y_{\text{CO}}(4\alpha_1 - 2 + y_{\text{CO}})}. \quad (3.2)$$

$$k_1 y_{\text{CO}}^2 - [3 - 2k_1(2\alpha_1 - 1)]y_{\text{CO}} + 4(1 - \alpha_1) = 0. \quad (4)$$

Квадратное уравнение (3.2) имеет следующее решение:

$$y_{\text{CO}} = \frac{3 - 2k_1(2\alpha_1 - 1) - \sqrt{[3 - 2k_1(2\alpha_1 - 1)]^2 - 16k_1(1 - \alpha_1)}}{2k_1}, \quad (5)$$

где $k_1 = 1 - k$. Ее зависимость от температуры приведена в таблице.

Таблица

Зависимость от температуры $k_1 = (1 - k) = F(t)$

Температура, °C	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
Константа равновесия, k_1	0,607	0,655	0,703	0,74	0,758	0,776	0,789

Температура, °C	1900	2000	2100	2200	2300	2400
Константа равновесия, k_1	0,801	0,813	0,825	0,837	0,841	0,845

Выявленные закономерности позволили разработать алгоритм расчета химического состава продуктов неполного сгорания топлива и температур горения при различных коэффициентах расхода первичного воздуха α_1 и

температурах его нагрева. Структура алгоритма представлена на рисунке. Блок ввода исходных данных 1 алгоритма содержит три секции. В первой секции заданы табулированные зависимости константы термодинамического равновесия от температуры [3, с. 387], во второй – химический состав компонентов газообразного топлива и низшая теплота сгорания, а в третьей – табулированные зависимости теплоемкости компонентов продуктов неполного сгорания и воздуха от их температуры [3, с. 385].

В блоке 2 алгоритма по формулам, полученным в монографии [3, с. 78] и работе [5], рассчитывают стехиометрические объемы продуктов полного сгорания топлива:

$$\text{CO}_{2\max} = \text{CO} + n(\text{C}_n\text{H}_{2n+2} + \text{C}_n\text{H}_{2n} + \text{C}_n\text{H}_n),$$

$$\text{H}_2\text{O}_{\max} = \text{H}_2 + \text{H}_2\text{S} + (n+1)\text{C}_n\text{H}_{2n+2} + n\text{C}_n\text{H}_{2n} + 0,5n\text{C}_n\text{H}_n, \quad (6)$$

где $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, C_nH_{2n} , C_nH_n – содержание алканов, алкенов и алкинов в исходном топливе в $\text{м}^3/\text{м}^3$. Необходимый объем воздуха определяют по формуле:

$$V_{\text{в}}^0 = 4,76 (\text{CO}_{2\max} + 0,5 \text{H}_2\text{O}_{\max} + 1,5 \text{H}_2\text{S} - 0,5 \text{CO}). \quad (7)$$

В блоке 3 проводят расчет фактических объемов азота и воздуха, предварительно задавая коэффициент расхода первичного воздуха α_1 . Кроме того, в блоке (3) по формуле (3) и ее частным случаям составляют квадратное уравнение, подобное (4) для метана, корнем которого является y_{CO} .

Для определения его численного значения предварительно задают, искомое значение температуры горения топлива, по которому в секции 1 блока 1 определяют табулированное значение константы равновесия k_1 . Результаты расчетов блока 3 направляют в блок 4, где рассчитывают объемы трех остальных компонентов продуктов неполного сгорания (CO_2 , H_2 , H_2O) и направляют результаты расчетов в блок 5. По рассчитанным объемам оксида углерода и водорода в блоке 5 определяют количество тепла, выделяемого при экзотермических реакциях неполного сгорания топлива:

$$Q_{\text{э}} = Q_{\text{н}}^{\text{р}} - 12645 y_{\text{CO}} - 10786 u_{\text{H}_2}, \text{ кДж/м}^3, \quad (8)$$

где 12645 кДж/м³ – теплота сгорания оксида углерода, 10786 кДж/м³ – теплота сгорания водорода.

Полученное количество тепла экзотермической реакции неполного сгорания топлива – $Q_{\text{э}}$ в блоке 5 передают в блоки 6 и 7, где соответственно рассчитывают температуры для холодных газо-воздушных смесей и калориметрические температуры, развиваемые при неполном сжигании топлива при нагреве воздуха. В эти блоки из блоков 2 – 4 также передают полные данные об объемах компонентов продуктов сгорания. Для расчета калориметрической температуры в блок 7 из блока 3 дополнительно передают

результаты расчета объема воздуха, соответствующее заданному коэффициенту его расхода α_1 .

В блоки 6, 7 из третьей секции блока исходных данных 1 также передают табулированные значения теплоемкости компонентов продуктов неполного сгорания, соответствующие заданным температурам.

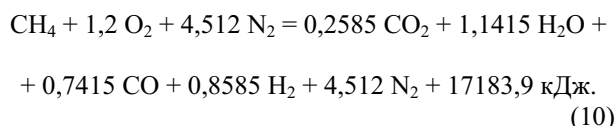
Кроме того, в блок 7 из третьей секции блока 1 направляют табулированное значение теплоемкости воздуха при заданной температуре его нагрева. Калориметрическую температуру рассчитывают по формуле:

$$t_{\text{кал}} = \frac{Q_{\text{э}} + Q_{\text{в}}}{C_{\text{CO}_2} \cdot V_{\text{CO}_2} + C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + C_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{N}_2} + C_{\text{CO}} \cdot V_{\text{CO}} + C_{\text{H}_2} \cdot V_{\text{H}_2}}, \quad (9)$$

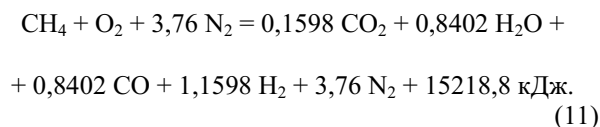
где $Q_{\text{в}}$ – тепло, вносимое с нагретым воздухом. В зависимости от полученных температур задаются новыми значениями t_{x} и $t_{\text{кал}}$ и, начиная с блока 3, используя метод итераций, повторяют расчет, обеспечивая заданную сходимость результатов. Для уменьшения числа итераций целесообразно использовать данные, полученные в результате расчетов по предлагаемому алгоритму для метана в монографии [3, с. 344 – 369] и работах [4] – [6].

Наибольший практический интерес представляют результаты расчета сжигания природного газа, приведенные в монографии [3, с. 362 – 363], при коэффициенте расхода первичного воздуха $\alpha_1 = 0,60$ и работе с «холодным» воздухом. Это обусловлено тем, что указанные условия весьма близки к верхней концентрационной границе воспламенения метана – 15 %.

Так, физико-химическая реакция при $\alpha_1 = 0,60$ соответствует 14,9 % содержания метана в горючей смеси:



Расчеты показали, что этой реакции соответствует температура 1494 °С. Кроме того, расчеты в монографии [3, с. 368 – 369], показали, что при нагреве воздуха до 400 °С коэффициент расхода первичного воздуха можно снизить до $\alpha_1 = 0,50$, так как этим условиям отвечает калориметрическая температура 1494 °С. Это убедительно свидетельствует о возможности реализации физико-химической реакции:



Из (11) следует, что подогрев воздуха до 400 °С позволяет повысить верхний предел воспламенения метана с 15 до 17,4 %. При этом согласно работам [1] – [2] подавляется образование сажистого углеро-

да. Кроме того, согласно реакциям (10) – (11) указанное снижение коэффициента α_1 позволяет увеличить содержание оксида углерода в сухих продуктах сгорания с 11,5 до 16,2 %, а водорода – с 13,0 до 19,6 % и тем самым существенно повысить восстановительные свойства продуктов неполного сгорания и, как следствие, качество поверхности металлопродукции.

Следует отметить, что коэффициенты перед всеми компонентами продуктов неполного сгорания физико-химических уравнений (10) – (11) приведены с точностью до четвертого знака после запятой. Это убедительно свидетельствует о том, что они получены достаточно сложным путем с использованием численных методов расчета.

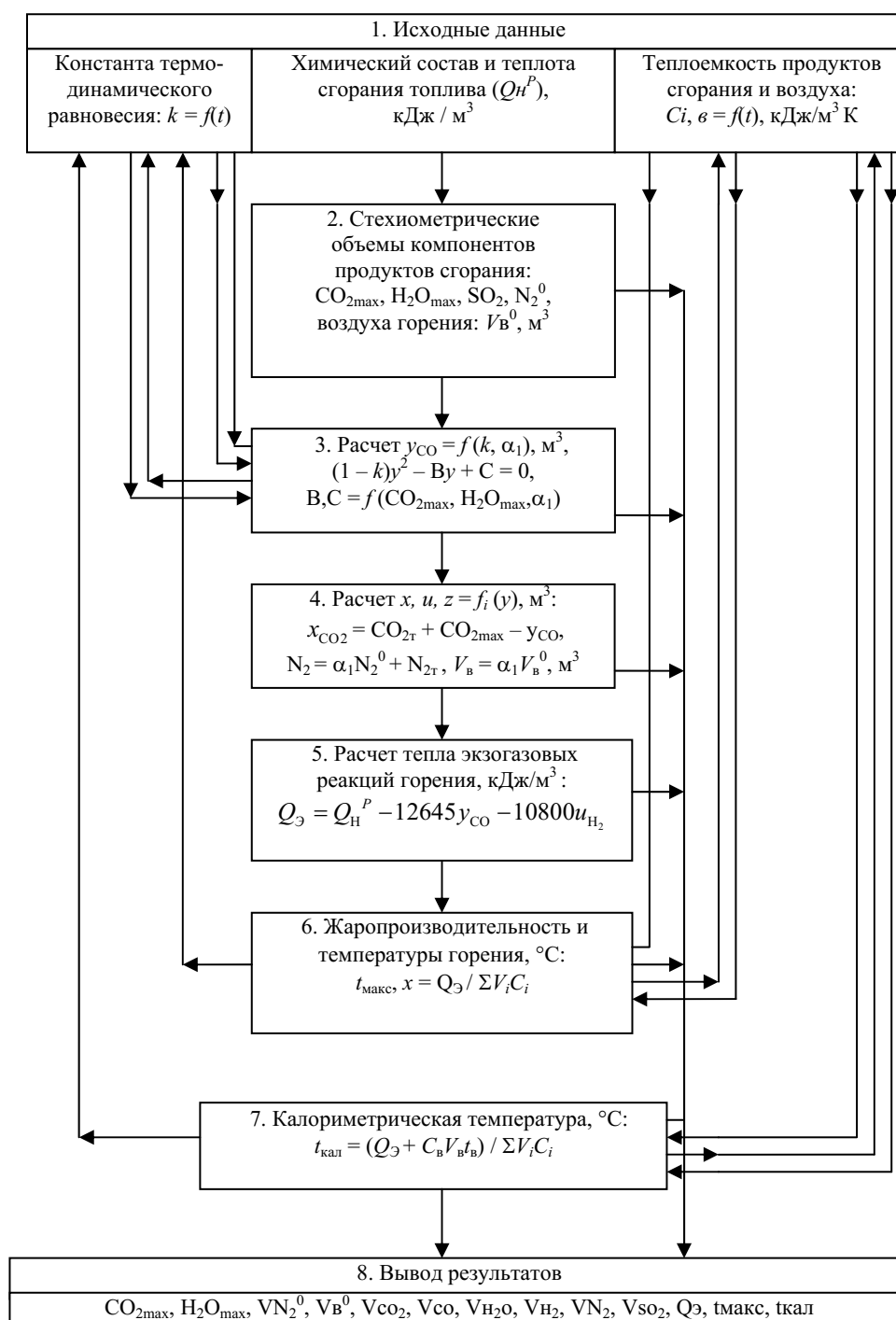


Рисунок. Алгоритм расчета неполного сгорания топлива

В настоящее время печи открытого малоокислительного нагрева с последовательными зонами сжигания и дожигания в зависимости от сортамента металлопродукции работают с коэффициентами расхода первичного воздуха $\alpha_1 = 0,50 - 0,60$. При $\alpha_1 = 0,50$ дожигание продуктов неполного сгорания проводят с коэффициентами расхода вторичного воздуха $\alpha_2 = 0,55 - 0,60$, а при $\alpha_1 = 0,60$ – с $\alpha_2 = 0,45 - 0,50$. В обоих вариантах суммарный коэффициент расхода воздуха составляет $\alpha_{\Sigma} = 1,05 - 1,10$.

В ходе эксплуатации протяжных печей метизного производства с последовательными зонами сжигания и дожигания при $\alpha_1 = 0,50 - 0,55$ была выявлена высокая инерционность изменения температуры зон окончательного нагрева проволоки, несмотря на существенное изменение расходов газа и воздуха при заданном соотношении. При этом зонах окончательного нагрева, в которых осуществляется дожигание продуктов неполного сгорания и через сопла подают только вторичный воздух, при изменении всех режимных параметров печи температура изменялась практически мгновенно.

В связи с этой особенностью был сделан вывод о целесообразности организации автоматической связи блока регулирования соотношения природного газа и первичного воздуха с контурами регулирования температуры в обеих зонах печи, а не только с зоной окончательного нагрева, как было общепринято в существующих системах автоматического регулиро-

вания печей открытого малоокислительного нагрева металлопродукции с двухстадийным сжиганием природного газа. Эксплуатация протяжных печей метизного производства показала, что указанная дополнительная связь позволяет исключить негативное влияние инерционности изменения температуры зоны окончательного нагрева на качество работы автоматики.

Литература

1. *Ващенко, А.И.* Окисление и обезуглероживание стали / [А.И. Ващенко и др.]. – М., 1972.
2. *Копытов, В.Ф.* Сжигание газа с недостатком воздуха / В.Ф. Копытов // Сталь. – 1954. – № 3. – С. 57 – 62.
3. *Юдин, Р.А.* Научно-технические основы процессов горения / Р.А. Юдин. – Череповец, 2013.
4. *Юдин, Р.А.* Основные закономерности неполного сгорания природного газа / [Р.А. Юдин и др.] // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – № 3. – Т. 1. – С. 26 – 29.
5. *Юдин, Р.А.* Особенности горения топлива произвольного химического состава / Р.А. Юдин, И.Р. Юдин // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2012. – № 1. – С. 15 – 18.
6. *Юдин, Р.А.* Разработка алгоритма расчета неполного сгорания природного газа / [Р.А. Юдин и др.] // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – № 3. – Т. 2. – С. 31 – 35.