

Нефтегазовое дело

Oil and gas

УДК 62-626.3

НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ АКАДЕМИКА НИКОЛАЯ СЕМЕНОВИЧА КУРНАКОВА

О.А.ДУБОВИКОВ, *д-р техн. наук, профессор, dubovikov_oa@mail.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Однажды профессор математики Ленинградского горного института Н.В.Липин сказал Н.С.Курнакову, что М.В.Ломоносов очень сетовал на свое недостаточное знакомство с математикой. На это выдающийся ученый ответил: «Ведь я же указывал Вам на это – мы все нуждаемся в математике, и чем больше развивается химия, тем больше она нуждается в математических обоснованиях».

По одному из сценариев международной неправительственной организации – Римского клуба, к середине XXI в. мировые запасы сырьевых ресурсов сократятся в 3 раза, а объем промышленного производства снизится многократно. По другому сценарию ресурсы уменьшатся только на треть, а объем промышленного производства сохранится на уровне начала века. Не только первый сценарий, но и второй предусматривает промышленную стагнацию. Для динамичного и устойчивого развития техногенной цивилизации это неприемлемо, и интенсивно набирающие темп экономики Китая, Индии, Бразилии и России опровергают прогноз Римского клуба, так как не были учтены возможности научно-технического прогресса по сокращению потребления энергии и использованию ее альтернативных источников, а также и возросший технологический потенциал человечества.

В связи с истощением запасов основных источников энергии (нефти и газа) многие специалисты связывают будущее мировой энергетики с возможностями переработки твердых энергоносителей. С экологической точки зрения наиболее предпочтительной является технология газификации твердого топлива. Поскольку теплотворная способность получаемого в результате газификации генераторного газа относительно мала по сравнению с природным газом, были проведены исследования возможности использования генераторного газа на промышленных предприятиях России в качестве альтернативы природному газу, доступ к которому имеется не во всех регионах.

Ключевые слова: академик Н.С.Курнаков, графоаналитический метод расчета, генераторный газ, калориметрическая температура горения, степень диссоциации диоксида углерода, степень диссоциации паров воды, теоретическая температура горения.

Потребление энергии во всем мире по ряду причин – рост численности населения, индустриализация и быстрый экономический рост развивающихся стран – постоянно увеличивается. Вместе с тем запасов основных источников энергии, по крайней мере, разведанных и легко добываемых с использованием существующих технологий, на сегодняшний день, по разным оценкам, осталось на 40-70 лет. Запасов же твердого ископаемого сырья: угли, сланцы, торф, сапропелиты – человечеству должно хватить не менее чем на тысячу лет. Объемы сырья, относящегося к возобновляемым источникам энергии, вообще считаются неограниченными [3]. В связи с этим изучение возможности перера-

ботки твердого топлива представляется весьма актуальным вопросом, требующим тщательного рассмотрения. Особое внимание уделяется технологии газификации угля как одной из наиболее перспективных технологий переработки твердых энергоносителей.

Главным преимуществом технологии газификации твердого топлива является низкий уровень негативного воздействия на окружающую среду. Это, в первую очередь, обусловлено достаточно продолжительным (более 3 с) нахождением газообразных продуктов газификации сначала в зоне окисления при температурах 1000-1200 °С, а затем в восстановительной зоне формирования генераторного газа. При таких условиях происходит термическое разложение и восстановительное дехлорирование наиболее опасных веществ – диоксинов, фуранов, полихлорбифенилов, бензапиренов и других полициклических ароматических углеводородов.

Еще одним преимуществом газификации в сравнении с прямым сжиганием твердого топлива является образование гораздо меньших объемов газов, подлежащих очистке. В результате более полного сгорания газообразного топлива образуется в разы, а по некоторым позициям и на порядки меньшее количество вредных для окружающей среды химических соединений, как в дымовых газах, так и в зольном остатке. Все это позволяет существенно экономить на дорогостоящем оборудовании очистки дымовых газов, выбрасываемых в атмосферу, и оборудовании обеззараживания твердых вторичных отходов.

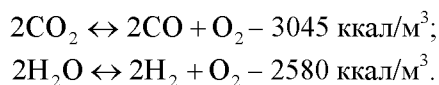
В силу относительно невысокой теплотворной способности получаемого в результате газификации генераторного газа по сравнению с природным газом необходимо было детально изучить процесс горения генераторного газа.

Для изучения был выбран генераторный газ следующего состава, % по объему: CO₂ 5,0; H₂S 0,3; C_mH_n 0,3; CO 26,5; H 13,5; CH₄ 2,3; N₂ 51,9; O₂ 0,2, влажность $W = 5,7 \text{ г/м}^3$.

Основные показатели процесса горения генераторного газа при принятом коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,10$ следующие:

Показатель	Значение
Теплотворная способность Q_n^p , кДж/м ³ (ккал/м ³)	5866 (1400)
Теоретическое количество воздуха $L_{\text{теор}}$, м ³ /м ³	1,22
Практическое количество воздуха $L_{\text{пр}}$, м ³ /м ³	1,35
Количество образующихся газообразных продуктов горения V_g , м ³ /м ³	2,15
Состав продуктов горения, % по объему:	
CO ₂	15,92
H ₂ O	9,23
N ₂	73,52
O ₂	1,19
SO ₂	0,14
Плотность продуктов сгорания ρ , кг/м ³	1,33
Теплосодержание продуктов горения i_0 , кДж/м ³ (ккал/м ³)	2728
Калориметрическая температура процесса горения t_k , °С	1646

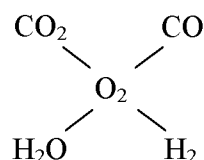
Поскольку калориметрическая температура горения практически недостижима из-за расхода тепловой энергии на частичную диссоциацию продуктов горения, необходимо рассчитать теоретическую температуру или температуру продуктов сгорания топлива при частичной диссоциации диоксида углерода и водяного пара [2, 4]. Процесс диссоциации продуктов горения описывается термохимическими уравнениями:



Определить теоретическую температуру сложнее, чем калориметрическую. Быстро, но приблизительно, можно определить теоретическую температуру горения с использованием графика, представленного на рис.1, на котором нанесены степени диссоциации диоксида

углерода и паров воды в зависимости от температуры и парциального давления компонентов [2, 4, 6].

Для точного определения теоретической температуры необходимо, чтобы в продуктах сгорания одновременно присутствовали CO_2 и H_2O и было установлено равновесие между пятью составными частями:



Графоаналитический метод, предложенный акад. Н.С.Курнаковым. Задачу можно решить в следующем порядке. По принятым различным значениям коэффициента диссоциации определяют соответствующую данному значению температуру продуктов сгорания. По полученным точкам строят в осях координат (коэффициент диссоциации – температура) кривую. Затем также по принятым различным значениям температур из уравнения равновесия определяют значения коэффициентов диссоциации. На той же сетке наносят новые данные. Пересечение двух кривых дает значения теоретической температуры и коэффициента диссоциации.

Используя данный метод, определим теоретическую температуру процесса горения генераторного газа:



Вычитая из реакции (2) реакцию (1), получаем



Состав продуктов горения (м^3) при диссоциации CO_2 и H_2O выразится следующим образом:

CO_2		$0,1592(1-x)$
CO		$0,1592x$
H_2O		$0,0923(1-y)$
H_2		$0,0923y$
O_2		$0,079x + 0,046y + 0,0119$
N_2		$0,7352$
SO_2		$0,0014$
<hr/>		
Итого		$1 + 0,079x + 0,046y$

Константы равновесия реакций (1) и (3):

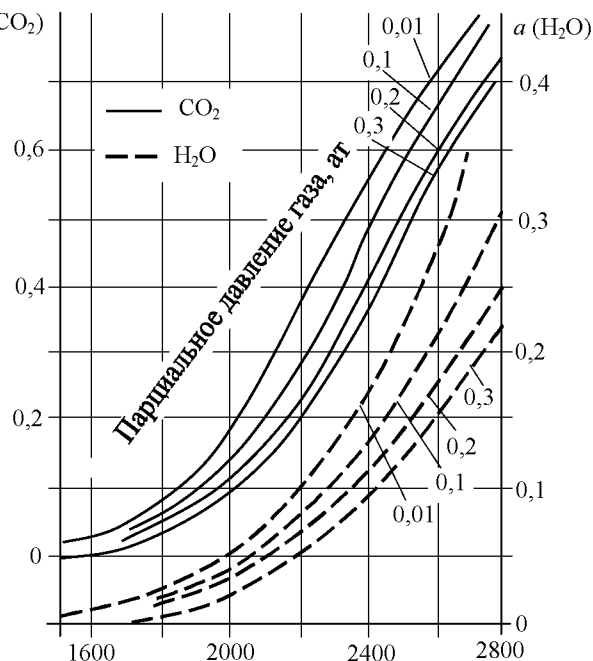


Рис. 1. График для определения степени диссоциации

$$K_1 = \frac{(\text{CO}_2)^2}{(\text{CO})^2 \text{O}_2} = \frac{(1-x)^2(1+0,079x+0,046y)}{x^2(0,079x+0,046y)};$$

$$K_3 = \frac{(\text{CO})(\text{H}_2\text{O})}{(\text{CO}_2)(\text{H}_2)} = \frac{x(1-y)}{(1-x)y} \rightarrow y = \frac{x}{K_3(1-x)+x}.$$

Здесь x – коэффициент диссоциации CO_2 ; y – коэффициент диссоциации H_2O .
При температуре равновесия по формулам Саккура находим K_1 и K_2 :

$$\lg K_1 = \frac{29250}{T} - 2,5 \lg T - 1,24;$$

$$\lg K_2 = \frac{25000}{T} - 2,5 \lg T + 2,68.$$

Константу равновесия для реакции (3) можно найти по уравнению

$$\lg K_3 = \frac{\lg K_2 - \lg K_1}{2}.$$

Температура равновесия 1700°C , $\lg K_1 = 5,347$ и $\lg K_3 = 7,638$.

Принимаем $x = 0,04$, тогда

$$y = \frac{0,04}{7,638(1-0,04)+0,04} = 0,0054,$$

следовательно,

$$\lg K_1 = \lg \frac{(1-0,04)^2(1+0,079 \cdot 0,04+0,046 \cdot 0,0054)}{0,04^2(0,079 \cdot 0,04+0,046 \cdot 0,0054)} = 5,229.$$

Принимаем $x = 0,03 \Rightarrow y = 0,004 \Rightarrow \lg K_1 = 5,61$,

$$x = 0,04 - \frac{(5,347-5,229)(0,04-0,03)}{(5,61-5,229)} = 0,037 \Rightarrow y = 0,00499.$$

Состав (м^3) и количество продуктов (% по объему) сгорания:

CO_2	0,1592(1-0,037)	0,1533	15,28
CO	0,1592·0,037	0,0059	0,59
H_2O	0,0923(1-0,00499)	0,0918	9,15
H_2	0,0923·0,00499	0,0005	0,05
O_2	0,079·0,037+0,046·0,00499+0,0119	0,0152	1,51
N_2	0,7352	0,7352	73,28
SO_2	0,0014	0,0014	0,14
Итого	1+0,079·0,037+0,046·0,00499	1,0033	100

Тепло для нагрева продуктов сгорания:

Горение генераторного газа . . .	$i_0 / 1,0033 = 647,7 / 1,0033 = 645,57$ ккал
Диссоциация CO_2	$-3045 \cdot 0,0059 = -17,97$ ккал
Диссоциация H_2O	$-2580 \cdot 0,0005 = -1,29$ ккал
Итого	$645,57 - (17,97 + 1,29) = 626,31$ ккал

Теплосодержание i' продуктов сгорания при $t' = 1600^\circ\text{C}$ равно $625,23$ ккал/ м^3 .

Теплосодержание i'' продуктов сгорания при $t'' = 1700^\circ\text{C}$ равно $668,42$ ккал/ м^3 .

Тогда

$$t = 1600 + \frac{626,35 - 625,23}{668,42 - 625,23} \cdot 100 = 1602^\circ\text{C}.$$

Температура равновесия 1600°C , $\lg K_1 = 6,195$ и $\lg K_3 = 6,69$.

Принимаем $x = 0,02 \Rightarrow y = 0,003$, $\Rightarrow \lg K_1 = 6,146$.

Принимаем $x = 0,01 \Rightarrow y = 0,0015 \Rightarrow \lg K_1 = 7,057$, $x = 0,0195 \Rightarrow y = 0,00296$,

$x = 0,0195 \Rightarrow y = 0,00296$.

Состав (м^3) и количество продуктов (% по объему) сгорания:

CO_2	$0,1592(1-0,0195)$	0,1561	15,56
CO	$0,1592 \cdot 0,0195$	0,0031	0,31
H_2O	$0,0923(1-0,00296)$	0,0920	9,17
H_2	$0,0923 \cdot 0,00296$	0,0003	0,03
O_2	$0,079 \cdot 0,0195 + 0,046 \cdot 0,00296 + 0,0119$	0,0137	1,36
N_2	0,7352	0,7352	73,28
SO_2	0,0014	0,0014	0,14
Итого	$1 + 0,079 \cdot 0,0195 + 0,046 \cdot 0,00296$	1,0018	100

Тепло для нагрева продуктов сгорания:

Горение генераторного газа . . .	$i_0/1,0018 = 647,7/1,0018 = 646,50$ ккал
Диссоциация CO_2	$-3045 \cdot 0,0031 = -9,44$ ккал
Диссоциация H_2O	$-2580 \cdot 0,0003 = -0,774$ ккал
Итого	$646,5 - (9,44 + 0,774) = 636,29$ ккал

Теплосодержание i' продуктов сгорания при $t' = 1600^\circ\text{C}$ равно $625,36$ ккал/ м^3 .

Теплосодержание i'' продуктов сгорания при $t'' = 1700^\circ\text{C}$ равно $668,67$ ккал/ м^3 .

Тогда

$$t = 1600 + \frac{636,29 - 625,36}{668,67 - 625,36} \cdot 100 = 1625^\circ\text{C}.$$

Сопоставим полученные данные:

x	y	t^*	t
0	0	1646	
0,0195	0,00296	1625	1600
0,037	0,00499	1602	1700

Далее теоретическую температуру горения генераторного газа определяем по графикам (рис.2).

Такой графоаналитический метод предложен акад. Н.С.Курнаковым и рекомендуется проф. Б.В.Старком как единственно возможный для случая, когда в продуктах сгорания одновременно присутствуют CO_2 , H_2O , CO , H_2 и O_2 [4].

Придерживаясь главного принципа школы Н.С.Курнакова: «Теоретические вопросы следует изучать на технически важных объектах» [5, 7], в Горном институте был разработан аналитический метод расчета, отличающийся от ранее предложенных методов большей точностью, так как не нужно строить графики, по которым сложно определить точное значение температуры.

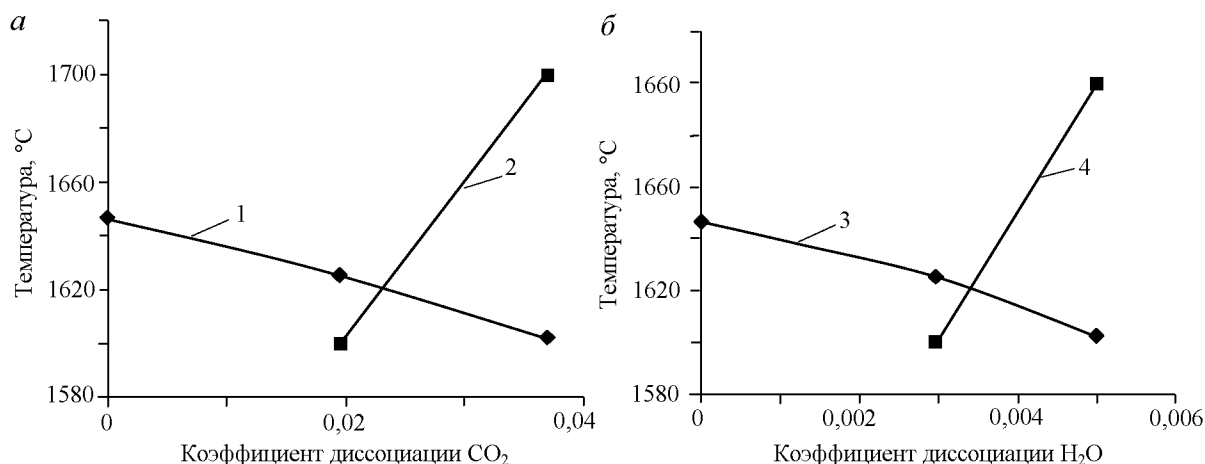


Рис.2. Определение теоретической температуры горения генераторного газа

$$1 - x = f(t^*); 2 - t = f(x); 3 - y = f(t^*); 4 - t = f(y)$$

Метод расчета теоретической температуры горения на примере генераторного газа. Воспользуемся методом последовательных приближений для решения системы нелинейных уравнений [1]. Составим систему уравнений, обладающую признаком сходимости, и введем новую величину z для упрощения расчетов:

$$\begin{cases} z = \frac{K_1 x^2}{(1-x)^2} = \frac{(1+0,079x+0,046y)}{(0,079x+0,046y)} \rightarrow x = \frac{-z \pm \sqrt{K_1 z}}{(K_1 - z)}; \\ y = \frac{x}{K_3(1-x)+x}. \end{cases}$$

Температура равновесия 1600°C , $K_1 = 1,568 \cdot 10^6$ и $K_3 = 6,69$. Принимаем $x = 0,02$, тогда

$$\begin{aligned} y &= \frac{0,02}{6,69(1-0,02)+0,02} = 0,003; \\ z &= \frac{1,568 \cdot 10^6 \cdot 0,02^2}{(1-0,02)^2} = 0,5831 \cdot 10^3; \\ x &= \frac{-0,5831 \cdot 10^3 \pm \sqrt{1,568 \cdot 10^6 \cdot 0,5831 \cdot 10^3}}{(1,568 \cdot 10^6 - 0,5831 \cdot 10^3)} = 0,01892. \end{aligned}$$

Принимаем $x = 0,01892 \rightarrow y = 0,0028713 \rightarrow z = 0,6158 \cdot 10^3$.

Аналогичным образом считаем значения x , y и z до тех пор, пока полученные значения не совпадут с заданными. Результаты вычислений приведены в таблице, в которой также представлены изменения значений x и y по отношению к первоначальному значению.

Состав (м^3) и количество продуктов (объемные доли) сгорания:

CO_2	$0,1592(1-0,01927)$	0,1561	0,1558
CO	$0,1592 \cdot 0,01927$	0,0031	0,0031
H_2O	$0,0923(1-0,002929)$	0,0920	0,0918
H_2	$0,0923 \cdot 0,002929$	0,0003	0,0003
O_2	$0,079 \cdot 0,01927 + 0,046 \cdot 0,002929 + 0,0119$	0,0141	0,0136
N_2	0,7352	0,7352	0,7340
SO_2	0,0014	0,0014	0,0014
Итого	$1 + 0,079 \cdot 0,01927 + 0,046 \cdot 0,002929$	1,0017	1

Результаты вычислений с использованием метода последовательных вычислений

Шаг	x	$\Delta x = x_n - x_{n+1}$	y	$\Delta y = y_n - y_{n+1}$	z
<i>Температура 1600 °С</i>					
1	0,02000	—	0,0030000	—	$0,5831 \cdot 10^3$
2	0,01892	+0,00108	0,0028713	+0,0001287	$0,6158 \cdot 10^3$
3	0,01944	−0,00052	0,0029553	−0,0000840	$0,5992 \cdot 10^3$
4	0,01918	+0,00026	0,0029148	+0,0000405	$0,6074 \cdot 10^3$
5	0,01931	−0,00013	0,0029350	−0,0000202	$0,6033 \cdot 10^3$
6	0,01924	+0,00007	0,0029240	+0,0000110	$0,6054 \cdot 10^3$
7	0,01927	−0,00003	0,0029290	−0,0000050	$0,6045 \cdot 10^3$
<i>Температура 1633 °С</i>					
1	0,02000	—	0,0030000	—	$0,5831 \cdot 10^3$
2	0,02619	−0,00619	0,0038305	−0,0008305	$0,4464 \cdot 10^3$
3	0,02299	+0,00320	0,0033501	+0,0004804	$0,5083 \cdot 10^3$
4	0,02450	−0,00221	0,0035758	−0,0002257	$0,4772 \cdot 10^3$
5	0,02376	+0,00174	0,0034641	+0,0001117	$0,4921 \cdot 10^3$
6	0,02411	−0,00035	0,0035186	−0,0000545	$0,4847 \cdot 10^3$
7	0,02394	+0,00017	0,0034915	+0,0000271	$0,4887 \cdot 10^3$
8	0,02403	−0,00009	0,0035065	−0,0000150	$0,4864 \cdot 10^3$
9	0,02398	+0,00005	0,0034975	+0,0000090	$0,4875 \cdot 10^3$
10	0,02400	−0,00002	0,0035020	−0,0000045	$0,4870 \cdot 10^3$
<i>Температура 1629 °С</i>					
1	0,02400	—	0,0035000	—	$0,4871 \cdot 10^3$
2	0,02308	+0,00082	0,003381	+0,000119	$0,5062 \cdot 10^3$
3	0,02352	−0,00044	0,003449	−0,000068	$0,4967 \cdot 10^3$
4	0,02331	+0,00021	0,003416	+0,000033	$0,5014 \cdot 10^3$
5	0,02341	−0,00010	0,003432	−0,000016	$0,4992 \cdot 10^3$
6	0,02336	+0,00005	0,003425	+0,000007	$0,5001 \cdot 10^3$
7	0,02338	−0,00002	0,003428	−0,000003	$0,4996 \cdot 10^3$
8	0,02337	+0,00001	0,003426	+0,000002	$0,4999 \cdot 10^3$
9	0,02338	−0,00001	0,003426	−0,000000	—

Теплосодержание продуктов горения:

Горение генераторного газа . . .	$2728 : 1,0017 = 2723 \text{ кДж/м}^3$
Диссоциация CO_2	$- 3045 \cdot 4,19 \cdot 0,0031 = 39,6 \text{ кДж/м}^3$
Диссоциация H_2O	$- 2580 \cdot 4,19 \cdot 0,0003 = 3,2 \text{ кДж/м}^3$
<u>Итого</u>	$i_0 = 2723 - 36,9 - 3,2 = 2680 \text{ кДж/м}^3$

Температура при данном теплосодержании

$$t = \frac{i_0}{\sum v_r \bar{c}_r},$$

где i_0 – теплосодержание продуктов горения, кДж/м³; v_r , – объемная доля продукта горения; $\bar{c}_r$ – средняя теплоемкость продукта горения, кДж/(м³·К).

Подставляем значения теплоемкостей при заданной температуре до тех пор, пока не получится тождество:

$$t_i = \frac{2680}{0,1558\bar{c}_{\text{CO}_2} + 0,7340\bar{c}_{\text{N}_2} + 0,0136\bar{c}_{\text{O}_2} + 0,0918\bar{c}_{\text{H}_2\text{O}} + 0,0031\bar{c}_{\text{CO}} + 0,0003\bar{c}_{\text{H}_2} + 0,0014\bar{c}_{\text{SO}_2}}.$$

Принимаем

$$t_i = 1600^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{шаг 1}} 1634^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{шаг 2}} 1632^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{шаг 3}} 1633^\circ\text{C}.$$

Температура равновесия 1633°C , $K_1=0,8054 \cdot 10^6$ и $K_3=7,0$.

Принимаем $x = 0,02 \rightarrow y = 0,003 \rightarrow z = 0,5831 \cdot 10^3$.

Состав (м^3) и количество (объемные доли) продуктов сгорания:

CO ₂	0,1592(1-0,02400)	0,1554	0,1558
CO	0,1592·0,02400	0,0038	0,0038
H ₂ O	0,0923(1-0,003502)	0,0920	0,0918
H ₂	0,0923·0,003502	0,0003	0,0003
O ₂	0,079·0,02400+0,046·0,003502+0,0119	0,01400	0,0140
N ₂	0,7352	0,7352	0,7336
SO ₂	0,0014	0,0014	0,0014
Итого	1+0,079·0,02400+0,046·0,003502	1,0021	1

Теплосодержание продуктов горения:

Горение генераторного газа	2728 : 1,0021 = 2722 кДж/м ³
Диссоциация CO ₂	- 3045·4,19·0,0038 = 48,5 кДж/м ³
Диссоциация H ₂ O	- 2580·4,19·0,0003 = 3,2 кДж/м ³
Итого	$i_0 = 2722 - 48,5 - 3,2 = 2676$ кДж/м ³

Температура с учетом вычисленного теплосодержания

$$t_i = \frac{2676}{0,1558\bar{c}_{\text{CO}_2} + 0,7336\bar{c}_{\text{N}_2} + 0,014\bar{c}_{\text{O}_2} + 0,0918\bar{c}_{\text{H}_2\text{O}} + 0,0038\bar{c}_{\text{CO}} + 0,0003\bar{c}_{\text{H}_2} + 0,0014\bar{c}_{\text{SO}_2}}.$$

Принимаем

$$t_i = 1600^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{шаг 1}} 1632^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{шаг 2}} 1629^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{шаг 3}} 1629^\circ\text{C}.$$

Температура равновесия 1629°C , $K_1=0,872 \cdot 10^6$ и $K_3=6,963$.

Принимаем

$$x = 0,024 \rightarrow y = 0,0035 \rightarrow z = 0,4871 \cdot 10^3.$$

Состав (м^3) и количество (объемные доли) продуктов сгорания:

CO ₂	0,1592(1-0,02338)	0,1554	0,1552
CO	0,1592·0,02338	0,0037	0,0037
H ₂ O	0,0923(1-0,003426)	0,0919	0,0918
H ₂	0,0923·0,003426	0,0003	0,0003
O ₂	0,079·0,02338+0,046·0,003426+0,0119	0,0139	0,0139
N ₂	0,7352	0,7352	0,7337
SO ₂	0,0014	0,0014	0,0014
Итого	1+0,079·0,02338+0,046·0,003426	1,002	1

Теплосодержание продуктов горения:

Горение генераторного газа	2728 : 1,0020 = 2722 кДж/м ³
Диссоциация CO ₂	- 3045·4,19·0,0037 = 47,2 кДж/м ³
Диссоциация H ₂ O	- 2580·4,19·0,0003 = 3,2 кДж/м ³
Итого	$i_0 = 2722 - 47,2 - 3,2 = 2672$ кДж/м ³

Температура с учетом вычисленного теплосодержания

$$t_i = \frac{2672}{0,1552\bar{c}_{\text{CO}_2} + 0,7337\bar{c}_{\text{N}_2} + 0,0139\bar{c}_{\text{O}_2} + 0,0918\bar{c}_{\text{H}_2\text{O}} + 0,0037\bar{c}_{\text{CO}} + 0,0003\bar{c}_{\text{H}_2} + 0,0014\bar{c}_{\text{SO}_2}}.$$

Принимаем

$$t_i = 1629\text{ }^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{шаг 1}} 1627\text{ }^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{шаг 2}} 1627\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Принятая температура 1629 °С и полученная 1627 °С отличаются на 2 °С, что для теплотехнических расчетов вполне достаточно. Таким образом, количество выполненных шагов будет определять точность вычислений.

Выводы

1. Метод последовательных приближений при расчете теоретической температуры горения топлива представляется более точным и менее трудоемким по сравнению с графоаналитическим методом, предложенным акад. Н.С.Курнаковым, так как не нужно строить графики, которые не позволяют точно определить температуру.

2. Приемлемые теплотворность $Q_n^p = 1400$ ккал/м³ и температура 1627 °С горения позволяют использовать генераторный газ на промышленных предприятиях России как альтернативный природному газу, доступ к которому имеется не во всех регионах.

Статья написана при финансовой поддержке Министерства образования и науки России в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям работы научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по теме «Разработка технологии и создание опытной установки для переработки низкосортного алюминиевого сырья» (Государственный контракт № 14.577.21.0127).

ЛИТЕРАТУРА

1. Виленкин Н.Я. Метод последовательных приближений. М.: Наука, 1968. 108 с.
2. Диомидовский Д.А. Metallургические печи цветной металлургии. М.: Металлургия, 1970. 704 с.
3. Копытов В.В. Газификация твердых топлив: ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития // Альтернативная энергетика и экология. 2011. № 6 (98). С. 10-13.
4. Линчевский В.П. Топливо и его сжигание. М.: Metallurgizdat, 1959. 400 с.
5. Морачевский А.Г. Академик Николай Семенович Курнаков и его научная школа. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. 99 с.
6. Равич М.Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов. М.: Наука, 1966. 416 с.
7. Федоров А.С. Творцы науки о металле. М.: Наука, 1980. 218 с.

REFERENCES

1. Vilenkin N.Ya. Metod posledovatel'nykh priblizhenii (*A method of successive approximations*). Moscow: Nauka, 1968, p.108.
2. Diomidovskii D.A. Metallurgicheskie pechi tsvetnoi metallurgii (*Metallurgical furnaces for non-ferrous metallurgy*). Moscow: Metallurgiya, 1970, p.704.
3. Kopytov V.V. Gazifikatsiya tverdykh topliv: retrospektivnyi obzor, sovremennoe sostoyanie del i perspektivy razvitiya (*Gasification of solid fuels: a retrospective review, the current situation and development prospects*). Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2011. N 6 (98), p.10-13.
4. Linchevskii V.P. Toplivo i ego szhiganie (*Fuel and its combustion*). Moscow: Metallurgizdat, 1959, p.400.
5. Morachevskii A.G. Akademik Nikolai Semenovich Kurnakov i ego nauchnaya shkola (*Academician Nikolay Semenovich Kurnakov and his scientific school*). St Petersburg: Izd-vo Politekhnikeskogo un-ta, 2010, p.99.
6. Ravich M.B. Uproshchennaya metodika teplotekhnicheskikh raschetov (*Simplified method of thermotechnical calculation*). Moscow: Nauka, 1966, p.416.
7. Fedorov A.S. Tvortsy nauki o metalle (*Creators of metal science*). Moscow: Nauka, 1980, p.218.

SCIENTIFIC HERITAGE OF ACADEMICIAN NIKOLAY SEMENOVICH KURNAKOV

O.A.DUBOVIKOV, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, dubovikov_oa@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

Once N.V.Lipin, a professor of mathematics at the Leningrad Mining Institute, told N.S.Kurnakov that M.V.Lomonosov had complained about his lack of familiarity with mathematics. The outstanding scientist replied «That's absolutely true, and I have already told you about it: we all need mathematics, and the more chemistry develops, the more it needs a mathematical justification».

According to one scenario of the international nongovernmental organization, the Club of Rome, there will be a three-fold decrease in the world's raw materials resources and multifold volume reduction in industrial production by the middle of the 21st century. Another scenario claims that raw materials will reduce only by one third, and the volume of industrial production will remain at the level of the beginning of the century. Not only the first scenario, but also the second one forecasts industrial stagnation. It is unacceptable for dynamic and sustainable development of the technological civilization. Intensively developing economies in China, India, Brazil and Russia defy the forecast of the Club of Rome, as it has not taken into account the possibility of scientific and technological progress in reducing energy consumption and using alternative sources, as well as the increased technological potential of the humanity.

Due to depletion of the main sources of energy (oil and gas), many experts link the future of the world's power industry with the possible use of solid energy resources. From the environmental point of view solid fuel gasification technology is the most preferable. As the calorific value of producer gas is relatively low in comparison with natural gas, some research of possible use of producer gas (as an alternative to natural gas which is available not in all regions) at Russian industrial enterprises has been conducted.

Key words: Academician N.S.Kurnakov, graphic-analytical calculation method, producer gas, calorimetric combustion temperature, dissociation degree of carbon dioxide, dissociation degree of water vapor, theoretical combustion temperature.