

УДК 621.181.001

В.Т. МИХАЙЛЮК

ОЦЕНКА СОСТАВА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИХ АНАЛИЗА

К настоящему времени сложилось определённое **несоответствие** между потенциальными возможностями современных средств непрерывной регистрации 9, 11, 16, 24 и более компонентов произвольной газовой фазы [1] и существующими методиками [2, 3, 4] оценок состава продуктов сгорания, используемыми при испытаниях, наладке и разработке топливосжигающих устройств.

Отмеченные методики окончательно сформировались в 30-х - 40-х годах 20-го столетия **на основе** фундаментальных работ по кинетике и физико-химической теории горения и газификации топлив - Я.Б.Зельдовича, Д.А.Франк-Каменецкого, Б.В.Канторовича, Н.Б.Лаврова, Н.Н.Семенова, Л.Н.Хитрина и др., - с **учётом** существовавших в то время требований к рациональному использованию топлива в промышленных установках и энергетике и **в полном соответствии** с тогдашним уровнем развития приборостроения.

Вместе с тем, при неизменной значимости фундаментальных работ в указанном направлении, практически *приложения их в части* оценок состава продуктов сгорания по результатам анализа характерных компонентов газовой фазы (безупречные там и тогда!), *стали утрачивать* свою актуальность сегодня.

Некоторые шаги по устранению отмеченного несоответствия предприняты и в данной работе, однако сам **способ** его разрешения **не может** быть поставленным при этом **в зависимость** от ряда якобы объективных предпосылок, а также субъективных факторов: имеющийся недостаточный технологический и эксплуатационный уровень осуществления процесса сжигания топлива, трудности отбора и обработки проб для последующего анализа [5, 6, 7], сложность, громоздкость и обилие расчётных **соотношений** данной методики, **не сводимых** к одной формуле в силу необходимости предварительной проверки условий их применимости и т.п.

Как и любая объективно существующая методика, так и рассматриваемая в частности, **предоставляет потенциальные** возможности в части использования результатов измерений современных приборных средств для более полных оценок состава продуктов сгорания, а **определение** при этом комплекса **возможных мероприятий** по учёту особенностей конкретики приложений - **выходит** за рамки поставленной задачи, т.к. лежит в более обширной области практического использования предлагаемой методики.

1. Для самого общего случая сжигания природных и искусственных топлив с использованием в качестве окислителей азот-кислородных смесей, содержащих горючие примеси, окислы углерода и серы, для **реальных** процессов, протекающих как на богатых ($\alpha > 1$), так и на бедных ($\alpha < 1$) смесях отмеченных реагентов, система уравнений, - отражающая балансы атомов по азоту, кислороду, аргону, углероду, сере, сумме сухих продуктов и водороду, - преобразована к виду:

$$\left. \begin{aligned} & \frac{1}{2}V_{H_2} + \frac{1}{2}V_{CO} + \frac{3}{2}V_{H_2S} + 3V_{CS_2} + 2V_{CH_4} + \left(\bar{n} + \frac{\bar{m}}{4}\right) S_V & \left\{ \begin{aligned} & (g_N + \alpha V^0 d_N) = V_{N_2} \\ & + \left[\begin{aligned} & (-U_T + \alpha U_T) \\ & (\gamma_0 + \alpha V^0 d_0) \end{aligned} \right] = V_{O_2} \\ & (g_A + \alpha V^0 d_A) = V_{Ar} \\ & + (g_C + \alpha V^0 d_C) = V_{CO_2} \\ & + (g_S + \alpha V^0 d_S) = V_{SO_2} \end{aligned} \right\}, \quad (1) \\ & -V_{CO} \qquad -V_{CS_2} \qquad -V_{CH_4} \qquad -\bar{n}S_V \\ & -V_{H_2S} \qquad -2V_{CS_2} \\ & \frac{3}{2}V_{H_2} + \frac{1}{2}V_{CO} + \frac{3}{2}V_{H_2S} + V_{CS_2} + 2V_{CH_4} + \left(1 + \frac{\bar{m}}{4}\right) S_V + \left[\begin{aligned} & (G_T - U_T) + \alpha (U_T + V^0 D) \\ & (G_T + \gamma_0 + \alpha V^0 D_0) \end{aligned} \right] = V_{\Sigma'} \\ & -V_{H_2} \qquad -V_{H_2S} \qquad -2V_{CH_4} \qquad -\frac{\bar{m}}{2} S_V & + (g_W + \alpha V^0 d_W) = V_{H_2O} \end{aligned} \right\}
 \end{aligned}$$

где в круглых скобках представлены теоретические, – соответствующие одноименному определению идеальных составов продуктов сгорания, – части объёмов (объёмы) азота, кислорода, аргона, диоксидов углерода и серы, сухих продуктов и водяных паров, форма выражения которых для богатых и бедных смесей реагентов имеет отличия только для кислорода и сухих продуктов, для которых верхние строки в квадратных скобках соответствуют условиям ($\alpha < 1$), а нижние – ($\alpha > 1$); $V_{\Sigma'}$ – сумма объёмов сухих продуктов сгорания; S_V – сумма объёмов высокомолекулярных углеводородных соединений, входящая в первую наряду с индивидуально обозначенными объёмами; \bar{n}, \bar{m} – средние числа атомов углерода и водорода в последней сумме; $g_N, g_A, g_C, g_S, g_W, G_T, U_T, d_N, d_O, d_A, d_C, d_S, d_W, D, D_0$ – индивидуальные и суммарные константы топлива и окислителя; γ_0, V^0 – условная константа реагентов и их стехиометрический коэффициент.

Вышеотмеченные константы, базирующиеся на составах окислителя и топлива, безотносительные, в своём конечном итоге, к фазовому состоянию последнего и полностью определяющие два исходных реагента в последующих расчётных соотношениях, в свою очередь, – для твёрдых либо жидких (1.1), газообразных (1.2) и топлив вообще (1.3), – выражаются в виде:

$$\left. \begin{aligned} & H_2O = \frac{V_{\mu}}{\mu_{H_2O}} W^P, \quad g_N = \frac{V_{\mu}}{\mu_{N_2}} \frac{N^P}{100}, \quad g_A = 0, \quad g_C = \frac{V_{\mu}}{\mu_C} \frac{C^P}{100}, \quad g_O = \frac{V_{\mu}}{\mu_{O_2}} \frac{O^P}{100} \\ & g_S = \frac{V_{\mu}}{\mu_S} \frac{S^P}{100}, \quad g_W = \frac{V_{\mu}}{\mu_{H_2}} \frac{H^P}{100} + \frac{H_2O}{100}, \quad U_T = g_C + g_S + \frac{1}{2} \frac{V_{\mu}}{\mu_{H_2}} \frac{H^P}{100} \end{aligned} \right\}, \quad (1.1)$$

$$\left. \begin{aligned} & H_2O = \frac{V_{\mu}}{\mu_{H_2O}} X, \quad g_N = \frac{N_2}{100}, \quad g_A = \frac{A_r}{100}, \quad g_C = \frac{1}{100} (CO_2 + CO + CS_2 + \sum n \cdot C_n H_m), \quad g_O = \frac{O_2}{100} \\ & g_S = \frac{1}{100} (H_2S + 2CS_2 + SO_2) \quad g_W = \frac{1}{100} (H_2O + H_2 + H_2S + \sum \frac{m}{2} C_n H_m) \\ & U_T = \frac{1}{100} \left[\frac{1}{2} (CO + H_2 + 3H_2S) + 3CS_2 + \sum \left(n + \frac{m}{4} \right) C_n H_m \right] \end{aligned} \right\}, \quad (1.2)$$

$$\left. \begin{aligned} & G_T = g_N + g_A + g_C + g_S, \quad Q_{XT} = Q_H, \quad Q_{\Phi T} = \bar{c}_T \bigg|_0^t \cdot t \end{aligned} \right\}, \quad (1.3)$$

где V_{μ} – объём одного киломоля газов при нормальных условиях;
 μ – молекулярные массы составляющих (кг/моль);

x - влагосодержание в кг водяных паров, приходящихся на один м³ сухого топлива при нормальных условиях (нм³).

Для окислителей константы выражаются аналогично газообразным топливам (1.2), но в обозначениях вместо символа "g*" присутствует символ "d*" с теми же нижними индексами "*". Единственное отличие состоит в определении влажности, которая может быть заданной либо непосредственно в процентах H₂O (если $t > 100^{\circ}\text{C}$), либо - через влагосодержание X -

$$H_2O = 100 \frac{\mu_{сух}}{\mu_{H_2O}} X, \quad \mu_{сух} = \frac{1}{100} \sum (\mu \cdot R) \quad (1.4)$$

где $\mu_{сух}$, μ - молекулярные массы сухого окислителя и его R -составляющих;
 X - число кг водяных паров, приходящихся на 1 кг сухого окислителя.
 Суммарные константы также аналогичны (1.3) -

$$D = d_N + d_A + d_C + d_S, \quad q_{XO} = \frac{1}{100} \sum (R \cdot Q_H), \quad q_{\phi o} = \bar{c}_o \Big|_o^t, \quad D_o = D + d_o \quad (1.5)$$

Воздух - в вышеобозначенных рамках - является частным случаем окислителя. Если его анализ не производится непосредственно перед подачей в камеру сгорания, то последний определяется как физическая константа, объёмный состав сухой части которой включает: 78.087% - (N₂+Δ), 20.950% - O₂, 0.933% - Ar и 0.030% - CO₂.

С учётом введенных обозначений, совместные константы реагентов компактно выражаются через их индивидуальные и суммарные

$$V^{\circ} = (U_T - g_o) / (d_o - U_o), \quad \gamma_o = -V^{\circ} d_o \quad (1.6)$$

Система уравнений (1) содержит в явном виде 15 неизвестных: 11 объёмов непосредственно указанных компонент, сумму объёмов углеводородных соединений S_V , средние числа атомов углерода (\bar{n}) и водорода (\bar{m}) в этой сумме, а также коэффициент избытка окислителя α . Для её разрешения (без учёта последнего соотношения для водяных паров), в общем случае, необходимы данные по 9-ти составляющим.

Если установлены - в процентах на сухую массу продуктов сгорания - объёмные концентрации H'_2 , CO' , CH'_4 , (CS'_2 либо H_2S'), N'_2 , O'_2 , Ar' , CO'_2 , SO'_2 , то определены и соответствующие объёмы в (1) посредством объёма сухих продуктов $V_{S'}$, который здесь выражается через наиболее представительную объёмную концентрацию азота

$$V_{S'} = 100 \frac{V_{N_2}}{N'_2} = 100 \frac{g_N + \alpha V^{\circ} d_N}{N'_2} \quad (2)$$

- При зарегистрированной концентрации CS'_2 , для временного исключения неизвестного V_{H_2S} , - второе (V_{O_2}) и шестое ($V_{S'}$) уравнения (1) складываются с пятым (V_{SO_2}), умноженным на 3/2. После переноса в правую часть всех индивидуальных объёмов и представления их посредством (2) объёмными концентрациями, три итоговых комплекса данных газового анализа определяются в виде

$$\left. \begin{aligned} \beta_o &= (O'_2 + 1.5SO'_2 - 0.5H'_2 - 0.5CO' - 2CH'_4) / N'_2 \\ \beta_c &= (CO'_2 + CO' + CH'_4 + CS'_2) / N'_2 \\ \beta' &= (100 + 1.5SO'_2 - 1.5H'_2 - 0.5CO' - 2CH'_4 + 2CS'_2) / N'_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

посредством которых система (1) сводится к трём базовым уравнениям

$$\left. \begin{aligned} \left(\bar{n} + \frac{\bar{m}}{4}\right) S_V &= \left\{ \begin{aligned} &U_T - 1.5g_S + \beta_0 g_N + \alpha \left[V^0 (\beta_0 d_N - 1.5 d_S) - U_T \right] \\ &-\gamma_0 - 1.5g_S - \beta_0 g_N + \alpha \left[V^0 (\beta_0 d_N - 1.5 d_S) + \gamma_0 \right] \end{aligned} \right\} \\ \bar{n} S_V &= g_C - \beta_C g_N + \alpha V^0 (d_C - \beta_C d_N) \\ \left(1 + \frac{\bar{m}}{4}\right) S_V &= \left\{ \begin{aligned} &U_T - G_T - 1.5g_S + \beta' g_N + \alpha \left[V^0 (\beta' d_N - 1.5 d_S - D) - U_T \right] \\ &-\gamma_0 - G_T - 1.5g_S + \beta' g_N + \alpha \left[V^0 (\beta' d_N - 1.5 d_S - D) + \gamma_0 \right] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

включающим 4 неизвестных: \bar{n} , \bar{m} , S_V и α ; верхние строки 1-го и 3-го уравнений здесь также соответствуют условиям ($\alpha < 1$), а нижние - ($\alpha > 1$).

Устранение неопределённости относительно области значений искомого α осуществляется путём грубой его оценки в виде α_{\max} , - в среднем отличающейся от истинной величины на 10% в большую сторону (при $\alpha = 1.1 \dots 1.2$, $\alpha_{\max} > \alpha$ на 4...3%; при $\alpha = 0.9 \dots 0.8$, $\alpha_{\max} > \alpha$ на 7...13%), - по второму уравнению (4) при $\bar{n} \cdot S_V = 0$.

$$\alpha_{\max} = (-p/q) = -(g_S - \beta_C g_N) / V^0 (d_C - \beta_C d_N). \quad (5)$$

После чего шесть параметров последней системы уравнений, (в т.ч. предварительно указанные в (5) p, q), определяются в виде:

$$\left. \begin{aligned} h &= \left\{ \begin{aligned} &(U_T - 1.5g_S + \beta_0 g_N)_{|\alpha < 1} \text{ либо } (-\gamma_0 - 1.5g_S + \beta_0 g_N)_{|\alpha > 1} \end{aligned} \right\} \\ l &= \left\{ \begin{aligned} &V^0 (\beta_0 d_N - 1.5 d_S) - U_T_{|\alpha < 1} \text{ либо } [V^0 (\beta_0 d_N - 1.5 d_S) + \gamma_0]_{|\alpha > 1} \end{aligned} \right\} \\ p &= (g_C - \beta_C g_N), \quad q = V^0 (d_C - \beta_C d_N) \\ r &= \left\{ \begin{aligned} &(U_T - G_T - 1.5g_S + \beta' g_N)_{|\alpha < 1} \text{ либо } (-\gamma_0 - G_T - 1.5g_S + \beta' g_N)_{|\alpha > 1} \end{aligned} \right\} \\ s &= \left\{ \begin{aligned} &V^0 (\beta' d_N - 1.5 d_S - D) - U_T_{|\alpha < 1} \text{ либо } [V^0 (\beta' d_N - 1.5 d_S - D) + \gamma_0]_{|\alpha > 1} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

- При зарегистрированной концентрации $H_2 S'$, для временного исключения из (1) неизвестного объёма CS_2 , - 2-е уравнение складывается с 5-м, умноженным на 3/2; из 4-го вычитается 5-е, умноженное на 1/2 и 6-е складывается с 5-м, умноженным на 1/2. В этом случае выражения (3), (4), (5), (6) принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \beta_0 &= (O'_2 + 1.5SO'_2 - 0.5H'_2 - 0.5CO' - 2CH'_4) / N'_2 \\ \beta_C &= (CO'_2 + CO' + CH'_4 - 0.5(SO'_2 + H_2 S')) / N'_2 \\ \beta' &= (100 + 0.5SO'_2 - 1.5H'_2 - 0.5CO' - 2CH'_4 + H_2 S') / N'_2 \end{aligned} \right\}, \quad (3')$$

$$\left. \begin{aligned} \left(\bar{n} + \frac{\bar{m}}{4}\right) S_V &= \left\{ \begin{aligned} &U_T - 1.5g_S + \beta_0 g_N + \alpha \left[V^0 (\beta_0 d_N - 1.5 d_S) - U_T \right] \\ &-\gamma_0 - 1.5g_S - \beta_0 g_N + \alpha \left[V^0 (\hat{\alpha}_0 d_N - 1.5 d_S) + \gamma_0 \right] \end{aligned} \right\} \\ \bar{n} S_V &= g_C - \beta_C g_N - 0.5g_S + \alpha V^0 (d_C - \beta_C d_N - 0.5 d_S) \\ \left(1 + \frac{\bar{m}}{4}\right) S_V &= \left\{ \begin{aligned} &U_T - G_T - 0.5g_S + \beta' g_N + \alpha \left[V^0 (\beta' d_N - 0.5 d_S - D) - U_T \right] \\ &-\gamma_0 - G_T - 0.5g_S + \beta' g_N + \alpha \left[V^0 (\beta' d_N - 0.5 d_S - D) + \gamma_0 \right] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\}, \quad (4')$$

$$\alpha_{\max} = (-p/q) = -(g_S - \beta_C g_N - 0.5g_S) / V^0 (d_C - \beta_C d_N - 0.5 d_S), \quad (5')$$

$$\left. \begin{aligned} h &= \left\{ (U_T - 1.5g_S + \beta_0 g_N) \Big|_{\alpha < 1} \text{ либо } (-\gamma_0 - 1.5g_S + \beta_0 g_N) \Big|_{\alpha > 1} \right\} \\ l &= \left\{ V^0 (\beta_0 d_N - 1.5 d_S) - U_T \Big|_{\alpha < 1} \text{ либо } [V^0 (\beta_0 d_N - 1.5 d_S) + \gamma_0] \Big|_{\alpha > 1} \right\} \\ p &= (g_C - \beta_C g_N - 0.5 g_S), \quad q = V^0 (d_C - \beta_C d_N - 0.5 d_S) \\ r &= \left\{ (U_T - G_T - 1.5g_S + \beta' g_N) \Big|_{\alpha < 1} \text{ либо } (-\gamma_0 - G_T - 0.5g_S + \beta' g_N) \Big|_{\alpha > 1} \right\} \\ s &= \left\{ V^0 (\beta' d_N - 0.5 d_S - D) - U_T \Big|_{\alpha < 1} \text{ либо } [V^0 (\beta' d_N - 0.5 d_S - D) + \gamma_0] \Big|_{\alpha > 1} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (6')$$

Таким образом, для конкретизированных значений параметров h, l, p, q, r, s , - либо согласно (6) с учётом (5), либо согласно (6') с учётом (5'), - рабочая система 3-х базовых уравнений принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} (\bar{n} + 0.25\bar{m}) S_V &= h + \alpha l \\ \bar{n} S_V &= p + \alpha q \\ (1 + 0.25\bar{m}) S_V &= r + \alpha s \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

При известной величине α , концентрация в продуктах сгорания, исключённого на 1-й стадии, серосодержащего компонента определяется из балансового уравнения по сере:

$$SO'_2 + H_2 S' + 2CS'_2 = \frac{g_S + \alpha V^0 d_S}{g_N + \alpha V^0 d_N} N'_2 \quad (8)$$

2. В процессе разрешения системы (7) возможны 3 характерные ситуации: 1) отсутствие в продуктах сгорания высокомолекулярных углеводородных примесей, т.е. если $S_V = 0$; 2) $S_V > 0$, но при этом возможна независимая оценка α ; 3) $S_V > 0$ и коэффициент избытка окислителя α является *искомой* величиной.

1) Необходимым (и обязательным!) условием существования решения в рамках первой ситуации является подтверждение факта равенства нулю S_V в виде:

$$(-h/l) = (-p/q) = (-r/s) = \alpha \quad (9)$$

- Если последнее условие - в пределах установленной погрешности результатов произведенного газового анализа - выполняется, то 11-компонентный состав продуктов сгорания определён: восстановлена концентрация исключённого серосодержащего соединения, рассчитаны все объёмы, в т.ч. и водяных паров по 7-му уравнению (1), уточнены объёмные концентрации полной и сухой массы.

- Если, с той же оговоркой, условие (9) не выполняется, то $S_V > 0$, что предопределяет возможность задания промежуточного решения системы (7) в параметрическом виде. В частности, результаты деления 1-го и 3-го уравнения на 2-е принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{m}}{4\bar{n}} &= \frac{h + \alpha l}{p + \alpha q} - 1, \quad \frac{\bar{m}}{4\bar{n}} = \frac{r + \alpha s}{p + \alpha q} = \frac{1}{\bar{n}} \end{aligned} \right\}$$

на основе равенства правых частей которых устанавливаются взаимосвязь между α и \bar{n} , а также зависимости от \bar{n} -параметра S_V и \bar{m} :

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\bar{n}(h - p - r) + p}{\bar{n}(s - l + q) - q}, \quad \bar{n} = \frac{p + \alpha q}{\alpha(s - l + q) - (h - p - r)}, \\ S_V &= \frac{p(s - l + q) + q(h - p - r)}{\bar{n}(s - l + q) - q}, \quad \frac{\bar{m}}{4} = \bar{n} \cdot \frac{s(h - p - r) + r(s - l + q)}{p(s - l + q) + q(h - p - r)} + \frac{pl - hq}{p(s - l + q) + q(h - p - r)} \end{aligned} \right\}$$

а с учётом принимаемых обозначений -

$$A = (h - p - r), \quad B = (s - l + q), \quad a_1 = 4 \cdot \frac{sA + rB}{pB + qA}, \quad a_0 = \frac{pl - hq}{pB - qA} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{\bar{n}A + p}{\bar{n}B - q} = \frac{S_V + A}{B}, \quad S_V = \frac{pB + qA}{\bar{n}B - q} = \alpha B - A, \quad \bar{m} = a_1 \bar{n} + a_0, \quad \bar{n} = \frac{p + \alpha q}{\alpha B - A} \quad (11)$$

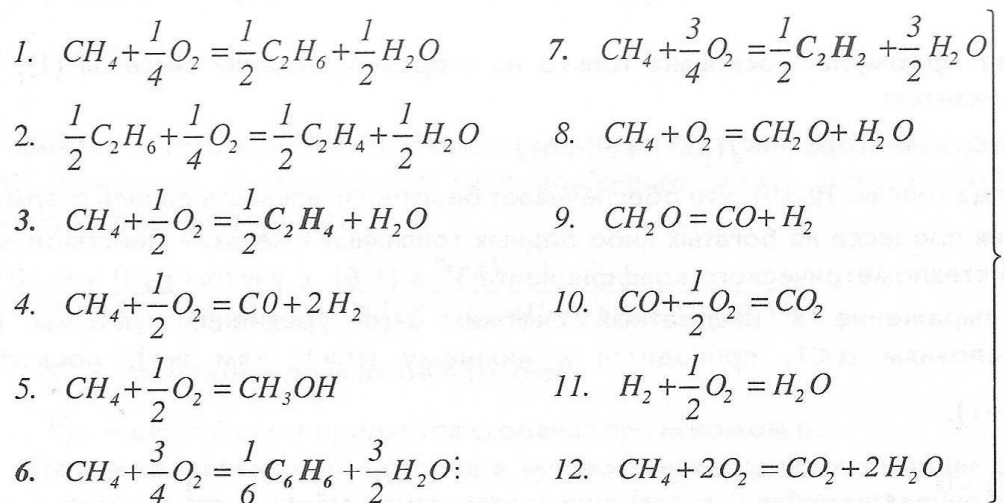
2) Независимая оценка α может быть произведена путём совместного решения 1-го и 3-го уравнений системы (1):

$$\left. \begin{aligned} \frac{g_N + \alpha V^0 d_A}{g_N + \alpha V^0 d_N} = \frac{V_{Ar}}{V_{N_2}}, \quad \frac{V_{Ar}}{V_{N_2}} = \frac{Ar' \cdot V_{\Sigma'}}{N_2' \cdot V_{\Sigma'}} \cdot \frac{100}{100} : \quad \alpha = \frac{g_A N_2' - g_N Ar'}{V^0 (d_N Ar' - d_A N_2')} \end{aligned} \right\}$$

Погрешность такого предсказания α определяется точностью регистрации объёмной концентрации аргона, в частности: при $\Delta Ar' = \pm 0.000005$, $\Delta \alpha = \pm 0.001$.

В данных обстоятельствах, наличие в продуктах сгорания примесей $C_n H_m$ устанавливается согласно (9), величина S_V и средние числа атомов углерода (\bar{n}) и водорода (\bar{m}) в этой сумме - в соответствии с (11), остальные уточнения производятся по схеме предыдущего пункта... На этом **приближённая** оценка состава продуктов сгорания, - **в данном** итоге представленных в полной своей массе 11-ю (с учётом H_2O и восстановленного соединения серы), индивидуальными компонентами и 12-й суммой высокомолекулярных углеводородных соединений, - **может быть завершена**. Вместе с тем, **возможна** и конкретизация последней суммы с учётом известных (\bar{n} , \bar{m})-характеристик S_V , составов топлива, окислителя и установленного соотношения последних в виде α , экспериментальных данных о равновесных концентрациях газов, а также особенностей процессов, протекающих на богатых либо бедных топливных смесях.

Компонентный состав S_V частично может быть определён на основе исследований равновесных концентраций газов в процессе неполного окисления и горения метана [8], представляемом следующим комплексом реакций:



Реакция 3 является суммарной для 1 и 2, наличие в продуктах сгорания CO , H_2 и остатков CH_4 - зафиксировано посредством газового анализа, определение равновесных концентраций метилового спирта (5) и формальдегида (8), - не входящих в выделенную сумму S_V , где $p > 2$, - отдельная задача. Остаются продукты реакций **3, 6, 7**, которые (наряду с другими компонентами!), **могут** (но не обязательно должны!), **присутствовать** в составе S_V -

$$(V_{C_2H_2}, V_{C_2H_4}, V_{C_2H_6}) \in S_V.$$

Способ отыскания решения **в такой** постановке задачи, - **имеющий** свои особенности для богатых и бедных смесей реагентов и **базирующийся** на некоторых допущениях относительно состава S_V (но в установленных рамках как величины **этой** суммы, так и её количественных (\bar{n} , \bar{m})-характеристик), **разработанный** также и в деталях, - здесь **не** приводится, т.к. **выходит** за изначальные пределы концепции её разрешения.

3) Процедура отыскания решения в третьей ситуации, базирующаяся на результатах анализа уже 8-ми компонентов (без аргона), как имеющая общий характер и дающая более точные оценки α - включает в себя и две вышеотмеченных.

В данных обстоятельствах выполняется последовательная проверка - по 28-ми выработанным соотношениям для α , - существования *единственного* решения в одной из 9-ти характерных здесь ситуаций, с учётом которого производится определение средней величины на множестве значений α , соответствующих конкретизированной ситуации и осуществляется итоговая оценка состава продуктов сгорания на этой основе. - Такова концепция общего способа разрешения поставленной задачи.

В русле компьютерного воплощения этой методики создан универсальный алгоритм, подкреплённый 39-ю числовыми примерами, охватывающими все возможные исходы в процессе отыскания решения.

На следующем этапе комплексной оценки предусматривается расчёт равновесного состава продуктов сгорания и соответствующей данному состоянию их адиабатической температуры с использованием в качестве вектора начального приближения опосредованных результатов настоящего этапа.

Сопоставление итоговых данных двух этапов намечается осуществлять путём "числового замораживания" продуктов сгорания (состав которых получен на втором этапе), при сохранении условий равновесия: в виде выражений для констант всех учтённых химических реакций, определяющих концентрации реагентов при данной текущей температуре и соответствующих тепловых эффектов протекания этих реакций, в свою очередь, определяющих значение адиабатической температуры в данном состоянии.

3. *Приближённые формулы оценки α* . - Все они [2, 3, 4, 5] базируются на каком-либо одном уравнении системы (1), предполагают отсутствие в продуктах сгорания углеводородных примесей ($S_V=0$), а также, в большей части, соединений серы и ориентированы на единственный окислитель - *воздух*, состоящий из 2-х компонент: N_2 и O_2 в соотношении 79 и 21%.

1) "*Кислородная*" формула - основана только на втором уравнении системы (1), при выводе которой допускается:

- отсутствие в продуктах сгорания H_2S' , CS'_2 , S_V ;

- не учёт кислорода топлива ($g_0=0$), что обеспечивает безотносительность данной формулы к условиям протекания процесса на богатых либо бедных топливных смесях. - Действительно, согласно выражению стехиометрического коэффициента V^0 в (1.6), с учётом $g_0=0$ и $U_0=0$ для воздуха, верхнее выражение в квадратных скобках 2-го уравнения системы (1), соответствующее условиям $\alpha < 1$, приводится к нижнему ($\alpha > 1$, там же), поскольку $\gamma_0 + \alpha V^0 d_0 = V^0 d_0 (\alpha - 1)$,

$$V^0 = \frac{U_T - g_0}{d_0 - U_0} = \frac{U_T - 0}{d_0 - 0}, \quad U_T = V^0 d_0 \quad \text{и} \quad -U_T(1 - \alpha) = U_T(\alpha - 1) = V^0 d_0 (\alpha - 1) \left. \right\},$$

и в условиях двух сделанных допущений второе уравнение системы (1) принимает вид:

$$V^0 d_0 (\alpha - 1) = [V_{O_2} - (0.5V_{H_2} + 0.5V_{CO} + 2V_{CH_4})] = [\Delta V] \left. \right\}. \quad (13)$$

- Третьим допущением **не** учитывается азот топлива и полагается, что содержание азота в **сухих** продуктах сгорания равно содержанию его в воздухе: $g_N=0$, $N'_2 = N_2$ ($r'_{N_2} = d_N$).

Тогда, в соответствии с определением объёмной доли произвольного компонента $\left(r' = \frac{V}{V_{\Sigma'}} \right)$, объём сухих продуктов сгорания в данных условиях будет выражаться в виде:

$$V_{\Sigma'} = \frac{V_{N_2}}{r'_{N_2}} = \frac{g_N + \alpha V^0 d_N}{r'_{N_2}} = \frac{0 + \alpha V^0 d_N}{d_N} = \alpha V^0 \left. \right\}. \quad (14)$$

После деления (13) на объём сухих продуктов в форме (14), правая часть (13) выразится в

виде суммы объёмных долей (в общем как $\Delta r'$), а левая - утратит стехиометрический коэффициент V^0 :

$$\frac{V^0 d_0(\alpha-1)}{V_{\Sigma'}} = \frac{\Delta V}{V_{\Sigma'}}, \quad \frac{V^0 d_0(\alpha-1)}{V^0 \alpha} = \Delta r', \quad \alpha = \frac{d_0}{d_0 - \Delta r'} \cdot \frac{100}{100},$$

$$\alpha_{O_2} = \frac{21}{21 - [O_2' - (0.5H_2' + 0.5CO' + 2CH_4')]} \quad (15)$$

2) "Азотная" формула – по сути является той же "Кислородной" за исключением третьего допущения. - Здесь объём сухих продуктов определяется через известную концентрацию азота в них (r'_{N_2}), однако содержание азота в топливе также не учитывается ($g_N=0$):

$$V_{\Sigma'} = \frac{V_{N_2}}{r'_{N_2}} = \frac{g_N + \alpha V^0 d_N}{r'_{N_2}} = \frac{\alpha V^0 d_N}{r_{N_2}} \quad (16)$$

После отнесения (13) к объёму сухих продуктов в форме (16), выражение для α приводится к виду

$$\frac{V^0 d_0(\alpha-1)}{\alpha V^0 d_N} \cdot r'_{N_2} = \Delta r', \quad \frac{\alpha-1}{\alpha} = \frac{d_N}{d_0} \cdot \frac{\Delta r'}{r'_{N_2}}, \quad \alpha = \frac{r_{N_2}}{r_{N_2} - \frac{d_N}{d_0} \cdot \Delta r'} \cdot \frac{100}{100},$$

$$\alpha_{N_2} = \frac{N_2'}{N_2 - 3.76 [O_2' - (0.5H_2' + 0.5CO' + 2CH_4')]} \quad (17)$$

где $3.76 \approx (d_N / d_0) \approx (0.79 / 0.21)$.

Вместе с тем, при использовании газообразных топлив [9, 10] с большим содержанием азота (например, генераторного либо доменного газов), рекомендуется [2, 3] применять "Азотную" формулу в виде:

$$\alpha'_{N_2} = \frac{N_2' - (N_2 / V_{\Sigma'})}{N_2' - (N_2 / V_{\Sigma'}) - 3.76 [O_2' - (0.5H_2' + 0.5CO' + 2CH_4')]},$$

где N_2 – процентная доля азота в топливе;

$V_{\Sigma'}$ – объём сухих продуктов сгорания при **искомом** α .

Эта неопределённость, которая в вышеотмеченных источниках не раскрывается, может быть устранена при использовании выражения для α , непосредственно вытекающего из 2-го уравнения системы (1) в рамках первых двух допущений "кислородной" формулы:

$$\alpha = \frac{\beta_0 g_N + W}{W - \beta_0 V^0 d_N}, \quad W = \begin{cases} U_T, & \text{при } \alpha < 1 \\ V^0 d_0, & \text{при } \alpha > 1 \end{cases}.$$

Это при $S_V=0$, а с учётом принятых допущений

$$a_0 = [O_2' - (0.5H_2' + 0.5CO' + 2CH_4')] / N_2', \quad U_T = V^0 d_0 \},$$

$$\alpha'_{N_2} = \frac{U_T + \beta_0 g_N}{U_T - \beta_0 U_T (d_N / d_0)} = \frac{1 + \beta_0 (g_N / U_T)}{1 - \beta_0 (d_N / d_0)} \quad (18)$$

для использования которой уже необходимо располагать информацией о составе топлива.

Кроме того, отличия значений α_{N_2} и α'_{N_2} – лежат в пределах погрешности предсказаний α приближенными формулами по данным газового анализа.

3) Разновидностью "Кислородной" формулы является также и "Углекислотная" [2, 3], расширенная [2] на условия "химической неполноты горения" (но в тех же рамках допущений

Таблица 1

где $\alpha = (\text{Значения } \alpha \text{ для различных составов продуктов сгорания и окислителей}) > 0$

Обозначения		Окислитель-1		Окислитель-2		Окислитель-3	
R'	α_*	$R', \%$	α_*	$R', \%$	α_*	$R', \%$	α_*
H_2	α	0.068018	0.801200	0.003948	1.101300	0.004650	1.116000
CO'		0.150647		0.008842		0.009964	
H_2S'	α_{O_2}		0.924571	0.001303	1.101088	0.001860	1.139797
CS_2'	α_{N_2}	0.001691	0.928450		1.094254		1.130940
CH_4'		0.874142	0.927036	0.050396	1.096117	0.066424	1.133528
N_2'	α_{RO_2}	83.589855	0.842913	84.159724	1.202097	83.645981	1.273642
O_2'	α_{SV}^0	0.144386		2.035144		2.715826	
Ar'	$-h/l$		0.908772		1.118621		1.132219
CO_2'	$-p/q$	13.374809	0.916959	12.530856	1.122149	12.350035	1.133647
SO_2'	$-r/s$	0.142083	0.986591	0.129598	1.125316	0.123661	1.142716

Таблица 2

Составы реагентов в объемных процентах

Топливо	H_2	CO	H_2S	CS_2	CH_4	C_2H_4	C_3H_6	C_4H_8	N_2	O_2	Ar	CO_2
	2.8	6.0	1.12	0.08	40	15	9	5	15	0.8	0.2	5

Окислители	H_2	CO	SO_2	CH_4	C_2H_4	C_3H_6	C_4H_8	N_2	O_2	Ar	CO_2
1	0.043	0.116	0.032	0.222				79.464	17.123	0.949	2.051
2	0.043	0.116	0.032	0.240	0.090	0.054	0.030	79.080	17.315	0.949	2.051
3								78.087	20.950	0.933	0.030

Если в процессе теста идентификации условия персистентности возбуждения выполняются, то первые двух размерных (учитывающая, - посредством коэффициента ψ , приводимого [3] для 60-ти видов топлив, - отношение объёма кислорода, израсходованного на окисление единицы топлива с образованием RO_2 и H_2O , к объёму RO_2 в продуктах сгорания (в условиях рассматриваемого метода это $CO_2' + SO_2'$, а в рекомендуемых - результат анализа на аппаратах Орса либо ВТИ-2), (21) является глобально экспоненциально устойчивым [15, стр. 72-75]. Таким образом, при $\alpha_{RO_2} = \frac{O_2' - (0.5H_2' + 0.5CO' + 2CH_4') + \psi(SO_2' + CO_2' + CH_4')}{\psi(SO_2' + CO_2' + CO' + CH_4')}$ достигаются глобально.

Сравниваемые величины α для трёх различных условий представлены в таблице 1, где в колонках " R' " приведены результаты газового анализа, а в столбцах " α_* " - полученные на этой основе величины коэффициентов избытка окислителя, соответствующие: 1) итоговому значению согласно данной методике (выделено жирным шрифтом); 2) приближенным оценкам этой величины, последняя из которых (α_{RO_2}) рассчитана при $\psi=0.75$ [3, 9], как для горючих газов с большим содержанием азота (см. табл.2); 3) априорным условиям решения системы уравнений (7) при $S_V=0$ - три последних строки, различные значения α в которых свидетельствуют об обратном - $S_V>0$, что не соответствует изначальным допущениям во всех приближенных формулах.

Кажущаяся близость итоговой величины α и предсказаний "Кислородной" и "Азотной" формул при $\alpha>1$ для Окислителя-2 - имеет случайный характер; причиной является конкретное содержание кислорода в данном окислителе ($O_2=17.315\%$, см. табл.2), а во всех приближенных формулах - полагается: $O_2=21\%$; подобное "совпадение" уже не имеет места для Окислителя-3, содержание кислорода в котором близко к 21%.

Выводы

Как следует из сравнительной таблицы 1, приближенные "кислородная", "азотная" и "углекислотная" формулы могут давать достоверные предсказания, если состав продуктов сгорания близок к "теоретическому", а используемый окислитель близок к воздуху.

В случае сжигания искусственных топлив в среде окислителей, отличающихся от воздуха, а также при имеющей место химической неполноте сгорания – эти формулы дают существенные отклонения.

Литература

1. Экспрессный многокомпонентный газоанализатор ЭМГ-20 / Федичкин И.Л., Ждан В.Т., Михайлюк В.Т., Козловский А.В. и др. // Промышленная теплотехника. - 1992. - №1-3. - С. 42-47.
2. Равич М.Б. Упрощенная методика теплотехнических расчётов. Теплотехнические расчеты по обобщённым константам продуктов сгорания. Издание 5-е. - М.: Наука, 1966, - 415 с.
3. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 416 с.
4. Теплотехнический справочник. Под общ. ред. Юренева В.Н. и Лебедева П.Д. Т.2, раздел шестой. - М.: Энергия. 1975.
5. Эстеркин Р.И., Иссерлин А.С., Певзнер М.И. Методы теплотехнических измерений и испытаний при сжигании газа. Справочное руководство. - Л.: Недра, 1972. - 376 с.
6. Методы отбора и обработки проб для лабораторных испытаний / ГОСТ 10742-71.
7. Газ горючий природный. Методы отбора проб / ГОСТ 18917-82 (СТ СЭВ 2102-80)
8. Лавров Н.В. Физико-химические основы процесса горения топлива.-М.: Наука, 1971. - 270 с.
9. Равич М.Б. Топливо и эффективность его использования в народном хозяйстве. - М.: Недра, 1971. - 358с.
10. Энергетическое топливо СССР. Справочник под ред. Зикеева Т.А. - М.: Энергия, 1968.