

IX.

Prof. K. SMOLEŃSKI.

Obliczenie spólczynnika nadmiaru powietrza etc. według analizy gazu saturacyjnego.^{*)}

W artykule p. t. „Ciekawy przypadek, nieuregulowanego biegu pieca wapiennego“¹⁾ podaliśmy na poszczególnym przykładzie sposób obliczenia, według danych analizy gazu saturacyjnego: a) spólczynnika nadmiaru (ewent. niedomiaru) powietrza, i b) ilości C, spalonego na 100 kg rozłożonego CaCO_3 . W artykule niniejszym podamy ogólny sposób obliczenia tych wielkości oraz wyprowadzimy gotowe wzory algebraiczne.

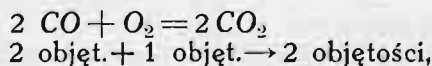
Gaz saturacyjny posiada skład następujący:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 & - a\% \text{ objętościowych,} \\ \text{O}_2 & - b\% \text{ } \\ \text{CO} & - c\% \text{ } \\ \text{N}_2 & - d = [100 - (a + b + c)]\%. \end{aligned}$$

I. Spólczynnik nadmiaru (ewent. niedomiaru) powietrza.

W celu wykonania dalszych obliczeń musimy przedewszystkiem znaleźć skład gazu, którybyśmy otrzymali, gdyby zawarty w pierwotnym gazie CO został spalony na CO_2 z teoretyczną ilością powietrza.

Pamiętając, że spalanie CO zachodzi według wzoru:



znajdziemy, że na spalanie $c\%$ CO trzeba użyć $\frac{c}{2}\%$ O_2 , przyczem utworzy się $c\%$ CO_2 . Gaz saturacyjny zawiera $b\%$ O_2 . Mogą tu teraz mieć miejsce trzy przypadki:

^{*)} Gaz. Cukr. 62, 1928 r., str. 161.

¹⁾ Gaz. Cukr., 61, 1927 r., str. 904 i „Prace“ niniejsze. XI.

1) $b > \frac{c}{2}$, mamy wtedy nadmiar powietrza, . . . (1)

2) $b = \frac{c}{2}$, mamy teoretyczną ilość powietrza . . (2)

3) $b < \frac{c}{2}$, mamy niedomiar powietrza (3)

1) *Przypadek nadmiaru powietrza:* $(b - \frac{c}{2}) > 0$.

Po spaleniu CO otrzymamy w gazie:

$$\begin{aligned} CO_2 &= (a + c) \\ O_2 &= \left(b - \frac{c}{2}\right) \\ N_2 &= 100 - (a + b + c) \end{aligned}$$

Razem gazu: $a + c + b - \frac{c}{2} + 100 - a - b - c = 100 - \frac{c}{2}$.

Procentowy skład gazu będzie więc następujący:

$$\begin{aligned} CO_2 &= \frac{100 (a + c)}{100 - \frac{c}{2}} = a_1 \% \\ O_2 &= \frac{100 \left(b - \frac{c}{2}\right)}{100 - \frac{c}{2}} = b_1 \% \\ N_2 &= \frac{100 [100 - (a + b + c)]}{100 - \frac{c}{2}} = d_1 \% = 100 - (a_1 + b_1) \end{aligned}$$

Przypuszczając: 1) że cały azot, zawarty w gazie, pochodzi wyłącznie z powietrza, użytego do spalania¹⁾ i 2) że tlen powietrza został użyty wyłącznie na spalenie C (w koksie)²⁾ — oraz pamiętając, że w powietrzu: 79 objętościom N_2 odpowiada 21 objętości O_2 , znajdziemy, że $d_1\%$ N_2 , zawartym w gazie, odpowiada

$b_2 = \frac{21}{79} d_1 = 0,266 d_1\%$ O_2 z powietrza, użytego do spalania. Teoretyczna zaś ilość tlenu b_1 , potrzebna do spalania koksu, jest mniejsza o tę ilość tlenu, jaka jest zawarta w gazie:

$$b_1 = b_2 - b_1 = 0,266 d_1 - b_1.$$

Wobec tego, że ilość powietrza jest proporcjonalna do ilości tlenu, t. zw. spółczynnik nadmiaru powietrza m , czyli stosunek

¹⁾ W rzeczywistości pewna, zresztą minimalna, ilość N_2 w gazie pochodzi z N_2 , zawartego w koksie.

²⁾ W rzeczywistości pewna, bardzo nieznaczna, ilość O_2 użyta zostaje na spalenie S i H_2 , zawartych w koksie.

ilości faktycznie użytego powietrza do ilości teoretycznie do spalania niezbędnej, wyrazi się wzorem:

$$m = \frac{b_2}{b_1} = \frac{0,266 d_1}{0,266 d_1 - b_1} \quad (4).$$

Przykład. Gaz saturacyjny cukrowni X posiadał przeciętnie skład następujący:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 - a &= 23,9\% \\ \text{O}_2 - b &= 6,0\% \\ \text{CO} - c &= 1,6\% \\ \text{N}_2 - d &= 68,5\% \end{aligned}$$

$$b - \frac{c}{2} = 5,2.$$

Gaz po spaleniu CO ma skład:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 - a_1 &= 25,7\% \\ \text{O}_2 - b_1 &= 5,2\% \\ \text{N}_2 - d_1 &= 69,1\% \end{aligned}$$

Stąd:

$$m = \frac{0,266 \times 69,1}{0,266 \times 69,1 - 5,2} = 1,39.$$

2) Przypadek teoretycznej ilości powietrza: $b - \frac{c}{2} = 0$.

Po spaleniu CO otrzymamy w gazie:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 - (a + c) \\ \text{O}_2 - 0,0 \\ \text{N}_2 - 100 - (a + b + c). \end{aligned}$$

Razem gazu: $a + c + 100 - a - b - c = 100 - b$.

Skład otrzymanego gazu:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 - \frac{100(a + c)}{100 - b} &= a_1 \\ \text{N}_2 - \frac{100[100 - (a + b + c)]}{100 - b} &= d_1 = 100 - a_1. \end{aligned}$$

A dalej według wyżej przytoczonych rozumowań:

$$\begin{aligned} b_2 &= 0,266 d_1 \\ b_1 &= b_2 \text{ (ponieważ } b_1 = 0) \end{aligned}$$

i

$$m = \frac{b_2}{b_1} = 1,0,$$

co, oczywiście, wynikało z samego postawienia zadania.

3) Przypadek niedomiaru powietrza: $\left(b - \frac{c}{2}\right) < 0$.

W tym przypadku dla spalania CO musimy „pożyczyć” O_2 , a więc powietrza, „z zewnątrz”. Ilość „pożyczonego” tlenu wyniesie:

$$\frac{c}{2} - b,$$

razem z nim wejdzie azot w ilości:

$$\frac{79}{21} \left(\frac{c}{2} - b \right) = 3,76 \left(\frac{c}{2} - b \right).$$

Po spaleniu CO otrzymamy w gazie:

$$CO_2 - (a + c)$$

$$O_2 - 0,0$$

$$N_2 - 100 - (a + b + c) + 3,76 \left(\frac{c}{2} - b \right) = 100 - a - 4,76b + 0,88c.$$

Razem gazu: $100 - 4,76b + 1,88c$.

Skład procentowy otrzymanego gazu:

$$CO_2 - \frac{100(a + c)}{100 - 4,76b + 1,88c} = a_1\%$$

$$N_2 - \frac{100[100 - a - 4,76b + 0,88c]}{100 - 4,76b + 1,88c} = d_1\% = 100 - a_1.$$

Dla obliczenia współczynnika m niedomiaru powietrza rozumiemy jak następuje: gaz saturacyjny zawierał d objętości azotu; po spaleniu zaś CO zawierał azotu: $d_1 = 100 - a - 4,76b + 0,88c$. Ilości tlenu i powietrza są proporcjonalne do ilości azotu. Ilość azotu d odpowiada ilości faktycznie użytego powietrza, zaś ilość d_1 — teoretycznie niezbędnej ilości powietrza. Stąd współczynnik niedomiaru powietrza:

$$m = \frac{d}{d_1} = \frac{100 - (a + b + c)}{100 - a - 4,76b + 0,88c} \quad (5)$$

lub

$$m = \frac{d}{d + 3,76 \left(\frac{c}{2} - b \right)} \quad (5').$$

Przykład (zapożyczony z cytowanej na początku pracy naszej).

Gaz saturacyjny posiadał skład:

$$CO_2 - a = 15,6\%$$

$$O_2 - b = 1,0\%$$

$$CO - c = 19,7\% \quad \frac{c}{2} - b = 8,85$$

$$N_2 - d = 63,7\%$$

$$d_1 = 100 - a - 4,76b + 0,88c = 97,0$$

$$m = \frac{63,7}{97,0} = 0,66.$$

Skład gazu po spaleniu CO będzie następujący:

$$CO_2 - a_1 = \frac{100(15,6 + 19,7)}{100 - 4,76 + 1,88 \times 19,7} = 26,7\%$$

$$N_2 - d_1 = 100 - a_1 = 73,3\%$$

$$K = \frac{p(\nu - \pi)}{\lambda - \mu} \dots \dots \dots (10)$$

Przykład. Przy składzie gazu, podanym w przykładzie poprzednim, kiedy:

$$\begin{aligned} a_k &= 13,2\% \\ a_w &= 125,0\% \end{aligned}$$

Znajdujemy ilość C spaloną na 100 cz. rozłożonego CaCO_3 :

$$p = \frac{12 \times 13,2}{12,5} = 12,67\%$$

Jeżeli koks zawiera $\lambda = 85\%$ C, z żużłem wychodzi $\mu = 1\%$ C, wapniak zawiera $\nu = 94\%$ CaCO_3 , a niedopał $\pi = 2\%$, to zużycie koksu na wapniak wyniesie:

$$K = \frac{12,67 \times (94 - 2)}{85 - 2} = 14,05\%$$

IV. Nadmiar koksu, użyty wskutek niecałkowitego spalania C (CO w gazie).

Wiemy, że 1 kg C, spalonego do końca. t. j. na CO_2 , daje 8080 Cal., ta sama zaś ilość węgla spalona do CO — daje tylko 2473 Cal. Obecność CO w gazie świadczy o niewyzyskaniu części ciepła potencjalnie w C (koksie) zawartego, a więc o zbytznym spalaniu pewnej ilości, pewnego nadmiaru C (koksu). Jak obliczyć ten nadmiar niepotrzebnie spalonego C (koksu)?

Z ogólnej ilości CO_2 , pochodzącego ze spalania C, równej według wzoru (6):

$$a_k = 0,266 d_1 - b_1$$

pewna ilość, którą oznaczamy przez f_1 , pochodzi ze spalania CO, zawartego w gazie saturacyjnym.

Według danych, zawartych w rozdziale I, ta ilość CO_2 , wyniesie:

1) w przypadku nadmiaru powietrza:

$$f_1 = \frac{100 c}{100 - \frac{c}{2}}$$

2) w przypadku teoretycznej ilości powietrza:

$$f_1 = \frac{100 c}{100 - b}$$

3) w przypadku niedomiaru powietrza:

$$f_1 = \frac{100 c}{100 - 4,76 b + 1,88 c}$$

Ponieważ zarówno 1 mol CO_2 jak 1 mol CO pochodzi ze spalania 1 atomu C, więc ze 100 cz. spalonego ogółem C spalone zostało:

a) do końca, t. j. na CO_2 : $\frac{100 (a_k - f_1)}{a_k} \%$

b) zaś do CO : $\frac{100 f_1}{a_k} \%$.

Zamiast pewnej ilości g węgla (C), spalonego do CO , wystarczy, ażeby otrzymać tę samą ilość ciepła (kaloryj), spalić do końca, t. j. na CO_2 , ilość:

$$g_1 = \frac{2473}{8080} g = 0,306 g.$$

Zamiast więc spalania $\frac{100 f_1}{a_k} \%$ wystarczy spalić

$$\frac{30,6 f_1}{a_k}$$

Stąd: nadmiar niepotrzebnie spalonego C (koks), czyli oszczędność C , którą można osiągnąć przez całkowite spalanie, wyrażona w %-tach spalonej ilości C , wyniesie:

$$\mu = \frac{100 f_1}{a_k} - \frac{30,6 f_1}{a_k} = \frac{69,4 f_1}{a_k} \% \quad \dots \quad (11)$$

Przykład. 1) Jeżeli weźmiemy przypadek, cytowany już parokrotnie, gdzie:

$$a_k = 13,2\%$$

$$\text{zaś } f_1 = \frac{100 \times 1,6}{100 - 0,8} = 1,6\%,$$

to nadmiar niepotrzebnie spalonego C wyniesie

$$\mu = \frac{69,4 \times 1,6}{13,2} = 8,4\% \text{ spalonej ilości } C.$$

Ponieważ spalono ogółem 12,67% C na CaCO_3 , więc można było oszczędzić:

$$\frac{12,67 \times 8,4}{100} = 1,07\% C \text{ na rozłożony } \text{CaCO}_3$$

czyli spalić:

$$12,67 - 1,07 = 11,60\%, \text{ zamiast } 12,67\% C.$$

2) Przypadek znacznego niedomiaru powietrza i znacznej zawartości CO w gazie.

Mamy pierwotny skład gazu:

$$\text{CO}_2 - 15,6\% = a$$

$$\text{O}_2 - 1,0\% = b$$

$$\text{CO} - 19,7\% = c$$

$$\text{N}_2 - 63,7\% = d$$

Po spaleniu zaś CO :

$$\text{CO}_2 - 26,7\% = a_1$$

$$\text{N}_2 - 73,3\% = d_1$$

Ilość CO_2 , pochodzącego ze spalania CO :

$$f_1 = \frac{100 c}{100 - 4,76 b + 1,88 c} = 14,9\%.$$

CO₂ ze spalania C:

$$a_k = 0,266 d_1 - b_1 = 0,266 \times 73,3 = 19,5\%.$$

CO₂ z rozkładu CaCO₃:

$$a_w = 26,7 - 19,5 = 7,2\%.$$

Stąd spalano C na 100 cz. CaCO₃:

$$p = 12 \times \frac{a_k}{a_w} = \frac{12 \times 19,5}{7,2} = 32,5\%.$$

Nadmiar C, niepotrzebnie spalonego wskutek spalania do CO zamiast na CO₂:

$$\mu = \frac{69,4 f_1}{a_k} = \frac{69,4 \times 14,9}{19,5} = 53,0\% \text{ spalanej ilości C.}$$

Zamiast więc spalanych 32,5% C można było z tym samym skutkiem cieplnym spalić:

$$\frac{32,5 (100 - 53,0)}{100} = 15,3\% \text{ C.}$$

V. Niektóre uwagi.

1. Ktoby chciał korzystać z przytoczonych wzorów do obliczania współczynnika nadmiaru powietrza i ilości C, spalonego na 100 cz. rozłożonego CaCO₃, winien pamiętać: a) że analizy gazu muszą być wykonane z całą umiejętnością i precyzją, na jaką pozwala metoda badania (w fabryce zwykle aparat Orsat'a¹⁾ i b) że do obliczeń należy mieć przeciętną analizę gazu, np. z 6 — 8 analiz, wykonanych przez zmianę.

2. Opisane obliczenia znakomicie nadają się do postawienia diagnozy pieca: korzystaliśmy z nich stale i bez zawodu (współ z p. W. Reicherm) przy naszych „studjach nad piecami wapiennymi”. Ku zdziwieniu (a początkowo niedowierzaniu!) personelu technicznego „zgadzywalismy” niedomaganie pieca, zanimemśy go nawet obejrzel. O skuteczności „zabiegów” sędziliśmy również według analizy gazu²⁾.

3. Jeżeli próba do analizy pobierana bywa, jak zwykle, z przewodu tłoczącego gaz na saturację, a więc za pompą, wtedy znaleziony współczyn-

¹⁾ Zwracamy uwagę kolegów na konieczność używania dokładnie przyrządzonych i świeżych odczynników absorbujących; dotyczy to szczególnie roztworu pirogallolu; przygotować go należy przed samą kampanją, przechowywać w szczelnie zamkniętym naczyniu i bez dostępu światła; roztwory w Orsacie należy od czasu do czasu zmieniać, dotyczy to szczególnie pirogallolu, który dość prędko wyczerpuje się (kontrola — oznaczenie O₂ w powietrzu!). Przy wykonaniu analizy należy pochłanianie odczynnikami powtarzać póty, póki objętość pozostałego gazu nie przestanie się zmieniać; szczególną uwagę pod tym względem zwrócić na pochłanianie O₂ i CO.

²⁾ Przypomina to diagnozę pewnych chorób według analizy uryny lub krwi pacjenta.

nik nadmiaru powietrza nie oznacza jeszcze, że taki właśnie nadmiar powietrza trafia do pieca i idzie na spalanie, gdyż na całej drodze gazu — od wylotu pieca aż do pompy — nadmiar powietrza może być wessany do gazu przez nieszczelności.

Chcąc oznaczyć rzeczywistą ilość powietrza, wchodzącą do pieca, należy pobrać próbę gazu z górnej części pieca poniżej wylotu gazu do przewodów. Powietrze trafia do gazu, według naszych spostrzeżeń, najczęściej przez szczelinę między dzwonem przykrywowym i lejem (nie mówiąc o powietrzu, trafiającem przy podnoszeniu dzwona w czasie ładowania). Ilość tego „ubocznego” powietrza jest niekiedy dość znaczna i bywa jedną z przyczyn (ale nie jedyną!) jednoczesnej zawartości w gazie dość znacznej ilości O_2 i CO (np. 6—7% O_2 i 1,8 — 2,0% CO). W jednej z fabryk, analizując próby gazu, pobrane wprost z pieca, wykryliśmy niedomiar powietrza, podczas kiedy próby, pobrane w zwykły sposób, dawały nadmiar powietrza.

Streszczenie.

Wyprowadzone zostały wzory do obliczania, według analizy gazu saturacyjnego, współczynnika nadmiaru powietrza i ilości C spalanego na 100 cz. rozłożonego $CaCO_3$.

I. Jeżeli gaz saturacyjny posiada skład:

$$\begin{aligned} CO_2 &= a\% \\ O_2 &= b\% \\ CO &= c\% \\ N_2 &= d\% \end{aligned}$$

to przy: 1) $b > \frac{c}{2}$ mamy nadmiar powietrza,

2) $b = \frac{c}{2}$ mamy teoretyczną ilość powietrza,

3) $b < \frac{c}{2}$ mamy niedomiar powietrza.

1) W przypadku nadmiaru powietrza gaz po spaleniu CO na CO_2 będzie posiadać skład:

$$CO_2 = \frac{100(a + c)}{100 - \frac{c}{2}} = a_1$$

$$O_2 = \frac{100\left(b - \frac{c}{2}\right)}{100 - \frac{c}{2}} = b_1$$

$$N_2 = 100 - (a_1 + b_1) = d_1$$

a współczynnik nadmiaru powietrza:

$$m = \frac{0,266 d_1}{0,266 d_1 - b_1}$$

2) W przypadku teoretycznej ilości powietrza, gaz po spaleniu CO będzie posiadał skład:

$$CO_2 = \frac{100(a+c)}{100-b} = a_1 \%$$

$$N_2 = 100 - a_1 = d_1$$

i $m = 1,0$.

3) W przypadku niedomiaru powietrza skład gazu po spaleniu CO będzie następujący:

$$CO_2 = \frac{100(a+c)}{100-4,76b+1,88c} = a_1$$

$$O_2 = 0,0$$

$$N_2 = 100 - a_1 = d_1$$

i współczynnik niedomiaru powietrza:

$$m = \frac{d}{d + 3,76 \left(\frac{c}{2} - b \right)}$$

II. Z ogólnej ilości $a_1 CO_2$, zawartego w gazie (po spaleniu CO), pochodzi ze spalania C (koks):

$$a_k = 0,266 d_1 - b_1$$

z rozkładu zaś $CaCO_3$:

$$a_w = a_1 + b_1 - 0,266 d_1.$$

III. Ilość C, spalanego na 100 cz. rozłożonego $CaCO_3$:

$$p = \frac{12 a_k}{a_w} \%$$

IV. Ilość C (koks), niepotrzebnie spalonego wskutek niecałkowitego spalania (do CO), wynosi:

$$\mu = \frac{69,4 f_1}{a_k} \% \text{ spalanego C,}$$

gdzie f_1 oznacza zawartość w gazie (po spaleniu CO) CO_2 , pochodzącego ze spalania CO:

$$f_1 = \frac{100 c}{100 - \frac{c}{2}} \text{ w przypadku nadmiaru powietrza,}$$

$$f_1 = \frac{100 c}{100 - b} \text{ przy teoretycznej ilości powietrza}$$

$$\text{i } f_1 = \frac{100 c}{100 - 4,76 b + 1,88 c} \text{ w przypadku niedomiaru powietrza.}$$

Prof. K. SMOLENSKI.

Calcul du coefficient de l'excès d'air etc d'après la composition des gaz des fours à chaux.

Résumé.

L'auteur déduit des formules servant au calcul direct de l'excès d'air et de la quantité de C (coke) brûlé pour la décomposition de 100 kgr. de CaCO_3 . I. Il est admis que la composition du gaz carbonique est:

CO_2 — a pour cent

O_2 — b „ „

CO — c „ „

N_2 — d „ „

Si: 1) $b > \frac{c}{2}$, il y a excès d'air,

2) $b = \frac{c}{2}$, la quantité d'air est, juste celle qui est théoriquement nécessaire,

3) $b < \frac{c}{2}$, la quantité d'air est insuffisante.

1) Dans le cas où il y a excès d'air la composition du gaz après la combustion complète du CO en CO_2 est:

$$\text{CO}_2 - \frac{100 (a + c)}{100 - \frac{c}{2}} = a_1$$

$$\text{O}_2 - \frac{100 \left(b - \frac{c}{2}\right)}{100 - \frac{c}{2}} = b_1$$

$$\text{N}_2 - 100 - (a_1 + b_1) = d_1$$

et le coefficient de l'excès d'air est:

$$m = \frac{0.266 d_1}{0.266 d_1 - b_1}$$

2) Dans le cas où la quantité d'air est théorique, la composition du gaz carbonique après la combustion complète du CO sera:

$$\text{CO}_2 - \frac{100 (a + c)}{100 - b} = a_1$$

$$\text{N}_2 - 100 - a_1 = d_1$$

et $m = 1.0$.

3) Dans le cas où la quantité d'air est insuffisante, la composition du gaz carbonique après la combustion du CO sera la suivante:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= \frac{100 (a + c)}{100 - 4,76 b + 1,88 c} = a_1 \\ \text{O}_2 &= 0,0 \\ \text{N}_2 &= 100 - a_1 = d_1 \end{aligned}$$

et le coefficient de l'insuffisance d'air sera:

$$m = \frac{d}{d + 3,76 \left(\frac{c}{2} - b \right)}$$

II. La quantité totale a_1 du CO_2 , contenue dans le gaz du four à chaux (après la combustion du CO), se compose de a_k qui résulte de la combustion du C (coke):

$$a_k = 0,266 d_1 - b_1$$

et de a_w qui résulte de la décomposition du CaCO_3 :

$$a_w = a_1 + b_1 - 0,266 d_1.$$

III. La quantité de C (coke) consommée sur 100 kgr. de CaCO_3 décomposé est:

$$p = \frac{12 a_k}{a_w} \text{ pour cent}$$

IV. La quantité de C (coke) inutilement brûlée par suite d'une combustion incomplète (jusqu'à la formation de CO) est la suivante:

$$p = \frac{69,4 f_1}{a_k} \text{ pour cent de la quantité totale du C consommé, où}$$

l'on désigne par f_1 la teneur en CO_2 dans le gaz carbonique qui résulte de la combustion complète du CO:

$$f_1 = \frac{100 c}{100 - \frac{c}{2}} \text{ dans le cas, où il y a excès d'air.}$$

$$f_1 = \frac{100 c}{100 - b} \text{ dans le cas, où la quantité d'air est théorique.}$$

$$f_1 = \frac{100 c}{100 - 4,76 b + 1,88 c} \text{ dans le cas, où il y a insuffisance d'air.}$$
