ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Nr 84 Energetyka z.11 1963

RYSZARD PETELA

Katedra Energetyki Cieplnej

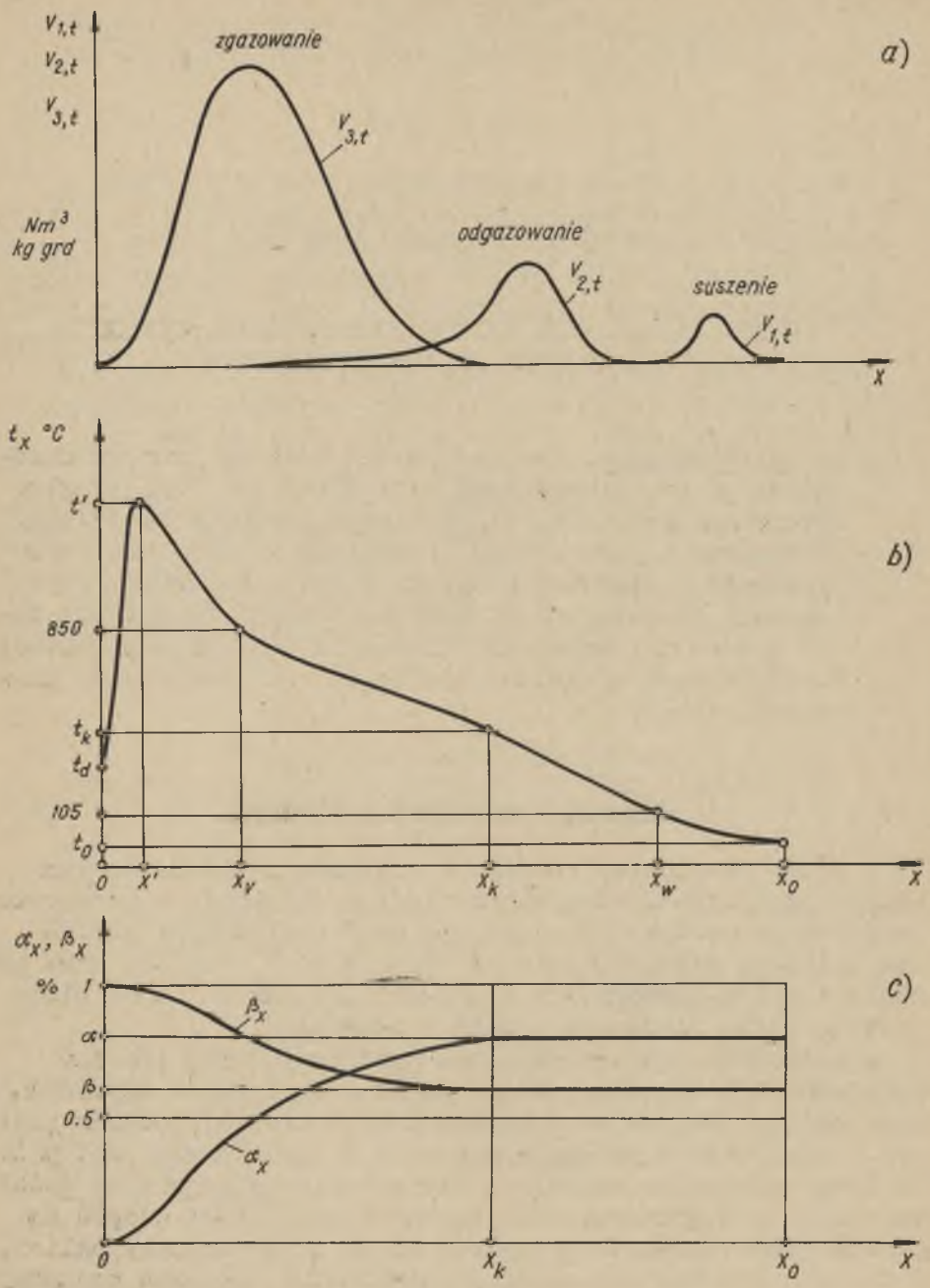
METODY BADANIA WSKAŹNIKÓW PROCESU CZADNICOWEGO PRZY PODMUCHU POWIETRZNO-PAROWYM

Streszczenie. Przeprowadzono analizę procesu czadnicowego przebiegającego w czadnicy zasilanej węglem kamiennym przy niskociśnieniowym podmuchu mieszaniny powietrza i pary wodnej. Rozważono ilości gazu otrzymywanego w czadnicy w wyniku procesu suszenia, odgazowania i zgazowania. Omówiono stopień rozłożenia pary wodnej α, wskaźnik utlenienia węgla β oraz metody badania tych wielkości oparte na analizie składu gazu czadnicowego.

1. Procesy zachodzące w czadnicy

W pracy niniejszej rozważono czadnice zasilane węglem kamiennym, niskociśnieniowe o ciągłym działaniu z podmuchem powietrzno-parowym. Przyjęto, że części mineralne paliwa nie działają katalitycznie na rozpatrywane zjawiska oraz pominięto wpływ temperatury topliwości popiołu na ilość pierwiastka węgla biorącego udział w reakcjach.

W procesie czadnicowym można wyodrębnić trzy procesy składowe, tj. suszenie, odgazowanie i zgazowanie doprowadzanego paliwa. Produktem w każdym z tych trzech procesów jest gaz. Substratem w procesie suszenia i odgazowania jest paliwo doprowadzane do czadnicy. Warunkiem przebiegu tych dwóch procesów jest doprowadzenie odpowiedniej ilości ciepła za pomocą gorących gazów przepływających przez warstwy paliwa, w których procesy zachodzą. Substratami w procesie zgazowania są tlen i para wodna zawarte w powietrzu wdmuchiwanym do czadnicy oraz część paliwa.



Rys. 1. Procesy zachodzące w czadnicy

Na rysunku 1a przedstawiono schematycznie intensywność procesu suszenia, odgazowania i zgazowania w zależności od pionowej odległości x mierzonej w górę od rusztu czadnicy. Każdej wartości x odpowiada pewna wartość temperatury t_x warstwy paliwa.

Przyjęto, że izotermiczne powierzchnie o stałej temperaturze paliwa wypełniającego szyb czadnicy są poziomymi płaszczyznami.

Gaz powstający w procesie suszenia składa się jedynie z pary wodnej wydzielającej się przy odparowaniu wilgoci paliwa. Przy określonej szybkości podgrzewania paliwa, w przedziale temperatur paliwa dt wydziela się $V_{1,w,t}$ pary wodnej. Sumaryczna ilość V_1 $Nm^3/(kg\ pal.\ such.)$ pary wodnej powstającej w procesie suszenia wyraża się wzorem:

$$V_1 = \int_{t_0}^{105^oC} V_{1,w,t}\,dt = \frac{22,42}{18}\,\frac{w_c}{1 - w_c} \qquad (1)$$

gdzie:

$V_{1,w,t}$ - intensywność procesu suszenia, w $Nm^3/(kg\ pal.such.)$ grd,

t_o - temperatura paliwa wprowadzanego do czadnicy (przeważnie równa temperaturze otoczenia),

w_c - wilgoć paliwa doprowadzanego do czadnicy, w kg/(kg pal.rob.).

Gaz powstający w procesie odgazowania składa się z wydzielonych produktów lotnych i pary wodnej (wilgoci pirogenetycznej) tworzącej się w wyniku wiązania się wodoru zawartego w paliwie z tlenem [12]. Przy określonej szybkości podgrzewania paliwa, w przedziale temperatur dt wydziela się ilość $V_{2,v,t}$ suchych produktów lotnych, oraz ilość $V_{2,w,t}$ pary wodnej. Suma wielkości $V_{2,v,t}$ i $V_{2,w,t}$ równa jest intensywności $V_{2,t}$ procesu odgazowania:

$$V_{2,t} = V_{2,v,t} + V_{2,w,t} \qquad (2)$$

Na rysunku 1b przedstawiono wykres średniej temperatury warstwy paliwa w czadnicy w zależności od odległości tej warstwy od rusztu. Jeżeli odgazowanie suchego paliwa przebiega w zakresie temperatur od 105 do 850°C (temperatura prażenia próbki przy oznaczeniu zawartości części lotnych według norm) wówczas wydzielają się w całości części lotne paliwa. Odgazowanie paliwa w powyższym zakresie temperatur zachodzi w czadnicy w warstwach położonych w przedziale od x_v do x_w. Dla temperatury t_x odpowiadającej wartości x zawartej w powyższym przedziale, ilość $V_{2,x}$ Nm³/(kg pal. such.) wilgotnych, surowych produktów lotnych wydzielonych w procesie odgazowania można przedstawić następująco:

$$V_{2,x} = \int_{850^\circ C}^{t_x} V_{2,t}\, dt \qquad (3)$$

Jeżeli przy określonej szybkości podgrzewania paliwa przyrost temperatury paliwa wynosi dt, wówczas odgazowuje ilość $dv = v_t\, dt$ części lotnych paliwa tworząc ilość $V_{2,t}dt$ surowych i wilgotnych produktów lotnych o gęstości normalnej $\gamma_{N,t}$. Wynika stąd następujący wzór:

$$V_{2,t}dt = \frac{v_t}{\gamma_{N,t}}\, dt = \frac{dv}{\gamma_{N,t}} \qquad (4)$$

Jeżeli temperatura $t_x = 105^\circ C$, wówczas otrzymuje się wzór:

$$V_2 = \int_{850^\circ}^{105^\circ C} \frac{v_t\, dt}{\gamma_{N,t}} = \frac{v}{\gamma_{N,m}} \qquad (5)$$

gdzie:

v – zawartość części lotnych w suchym paliwie, w kg/(kg pal. such.),

$\gamma_{N,m}$ – średnia gęstość w warunkach normalnych (0°C, 760 mm Hg) surowych i wilgotnych produktów lotnych otrzymanych przez odgazowanie całej zawartości części lotnych v, w kg/Nm³.

Ilość $V_{2,v}$ $Nm^3/(kg\ pal.\ such.)$ suchego gazu surowego otrzymanego w procesie odgazowania paliwa w zakresie temperatur od 105 do 850°C można wyrazić wzorem:

$$V_{2,v} = \frac{v}{\gamma_{N,m}} - \int_{850°}^{105°C} V_{2,w,t}\, dt \qquad (6)$$

Cała wilgoć pirogenetyczna otrzymana przy odgazowaniu paliwa wyraża się wzorem [1,6,8]:

$$\int_{850°}^{105°C} V_{2\,w,t}\, dt = \frac{22,42}{16}\, 0,55\, o = 0,77\, o \qquad (7)$$

gdzie:

o - zawartość tlenu w paliwie, w kg/(kg pal. such.)

Po wstawieniu równania (7) do (6) otrzymuje się wzór:

$$V_{2,v} = \frac{v}{\gamma_{N,m}} - 0,77\, o \qquad (8)$$

W czasie ochładzania i oczyszczania gazu powstałego w procesie odgazowania wykrapla się część wilgoci pirogenetycznej oraz zostaje częściowo usunięta smoła, benzol i amoniak. Ilość $V_{2,v,o}$ $Nm^3/(kg\ pal.\ such.)$ suchego i oczyszczonego gazu otrzymanego w procesie odgazowania można przedstawić następująco:

$$V_{2,v,o} = \frac{(v - \frac{18}{16}\, 0,55\, o)\, n}{\gamma_N} = \frac{(v - 0,618\, o)n}{\gamma_N} \qquad (9)$$

gdzie:

n - liczba uwzględniająca procentowe zmniejszenie się ilości gazu na skutek częściowego usunięcia smoły, benzolu i amoniaku w czasie ochładzania i oczyszczania produktów procesu odgazowania,

γ_N - średnia gęstość w warunkach normalnych oczyszczonych, suchych produktów lotnych, w kg/Nm^3.

Liczbę n można w przybliżeniu określić następująco:

$$n = \frac{v - 0{,}618\ o - g_s - g_b - g_a}{v - 0{,}618\ o} \qquad (10)$$

gdzie:

g_s, g_b, g_a - otrzymywane ilości smoły, benzolu i amoniaku, w kg/(kg pal. such.).

Ilości otrzymywanej smoły, benzolu i amoniaku przy odgazowywaniu takiego samego paliwa mogą być różne zależnie od sposobu realizacji procesu odgazowania [14].

Orientacyjną wartość liczby n można określić rozważając następujący przykład [9]. Odgazowując w koksowni węgiel kamienny o zawartości części lotnych v = 23,8% oraz tlenu o = 4,9% otrzymano przy ochładzaniu i oczyszczaniu produktów odgazowania z 1 kg suchego węgla 34,8 g smoły, 9,8 g benzolu i 3,2 g amoniaku. Na podstawie wzoru (10) otrzymuje się wartość:

$$n = \frac{0.238 - 0.618.0.049 - 0.0348 - 0.0098 - 0.0032}{0{,}238 - 0{,}618\ .\ 0{,}049} = 0{,}77$$

Zawartość tlenu w paliwie zależy na ogół od wieku geologicznego paliwa [3,10], który można charakteryzować wskaźnikiem v zawartości części lotnych w rozważanym paliwie. Otrzymuje się wówczas następujący wzór:

$$o = 0{,}7\ v^2 \qquad (11)$$

Po wprowadzeniu zależności (11) do (8),

$$V_{2,v} = \frac{v}{\gamma_{N,m}} - 0{,}539\ v^2 \qquad (12)$$

lub (11) do (9)

$$V_{2,v,o} = \frac{v - 0{,}433\ v^2}{\gamma_N}\ n \qquad (13)$$

Z procesem zgazowania zachodzącym w czadnicy związane jest zjawisko spalania. Zjawisko zgazowania i spalania przebiegają w czadnicy równolegle. W wyniku zjawiska spalania powstaje CO_2, natomiast w procesie zgazowania powstaje H_2 i CO. Temperatura t_x warstw paliwa w zależności od odległości x zmienia się od pewnej wartości t_d dla x = 0 (rys.1b) poprzez wartość maksymalną t' dla x = x' i t_k dla $x = x_k$ do wartości t_o dla $x = x_o$. Temperatura t_d jest średnią temperaturą warstwy spoczywającej bezpośrednio na ruszcie czadnicy. Temperatura t_k jest to temperatura, poniżej której już praktycznie nie zachodzą w czadnicy żadne reakcje zgazowania. Substratami procesu zgazowania są CO_2, H_2O oraz pewna ilość pierwiastka węgla pochodzącego z paliwa. Produktami procesu zgazowania są CO, H_2, CH_4 i C_nH_m. Ilości CH_4 i C_nH_m powstające w procesie niskociśnieniowego zgazowania są małe i w praktycznych obliczeniach można je pominąć. Przy określonych warunkach procesu zgazowania w przedziale temperatur dt powstaje ilość $V_{3,\alpha,t}$ wodoru i $V_{3,\beta,t}$ tlenku węgla. Suma intensywności $V_{3,\alpha,t}$ powstawania wodoru i intensywności $V_{3,\beta,t}$ powstawania tlenku węgla równa się intensywności $V_{3,t}$ procesu zgazowania:

$$V_{3,t} = V_{3,\alpha,t} + V_{3,\beta,t} \qquad (14)$$

W praktyce rozpatruje się najczęściej pewne stadium procesu zgazowania odpowiadające wartościom x większym od x'. Przy

określonych warunkach procesu sumaryczna ilość $V_{3,x}$ Nm^3/(kg pal. such.) produktów procesu zgazowania przedstawia się następująco:

$$V_{3,x} = \int_{t_d - t'}^{t_x} (V_{3,\alpha,t} + V_{3,\beta,t})\, dt \qquad (15)$$

Przez warstwy paliwa w czadnicy przepływa również ilość $V_{3,r,x}$ Nm^3/(kg pal. such.) gazu składającego się z obojętnego azotu pochodzącego z powietrza podmuchowego oraz z reszty nie rozłożonych w procesie zgazowania gazów tj. CO_2 i H_2O. Ilość tę można wyrazić następującym wzorem:

$$V_{3,r,x} = V_L(1 + 1{,}245\, w_p) - 0{,}5\, V_{3,x} \qquad (16)$$

gdzie:

V_L - ilość suchego powietrza doprowadzanego pod ruszt czadnicy, w Nm^3/(kg pal. such.),

w_p - wilgoć nasyconego powietrza podmuchowego, w kg/(Nm^3 such. pow.).

2. Wskaźniki procesu zgazowania

Przy badaniu procesu zgazowania dogodnie jest wprowadzić stopień rozłożenia pary i wskaźnik utlenienia węgla [8].

Stopień rozłożenia pary wodnej jest to stosunek ilości rozłożonej pary w procesie zgazowania do ilości pary wdmuchiwanej z powietrzem pod ruszt czadnicy. Stopień rozłożenia pary α_x zależy od odległości x (rys.1c). Dla $x > x'$ wartość α_x zmienia się następująco:

$$\alpha_x = \frac{18}{22{,}42\, w_p V_L} \int_{t_d - t'}^{t_x} V_{3,\alpha,t}\, dt \qquad (17)$$

Dla temperatury $t_x \leq t_k$ stopień rozłożenia pary wodnej osiąga wartość końcową $\alpha_x = \alpha$.

Wskaźnik utlenienia węgla β_x definiuje się następującym wzorem:

$$\beta_x = \frac{0,5 + \delta_x}{1 + \delta_x} \tag{18}$$

w którym δ_x oznacza stosunek udziału objętościowego CO_2 do udziału objętościowego CO w gazach biorących udział w procesie zgazowania.

$$\delta_x = \frac{0,21\ V_L + \int_{t_d - t'}^{t_x} (0,5\ V_{3,\alpha,t} - V_{3,\beta,t})dt}{\int_{t_d - t'}^{t_x} V_{3,\beta,t}\ dt} \tag{19}$$

Po podstawieniu wyrażenia (19) do (18) oraz po wykorzystaniu wzoru (15) otrzymuje się po przekształceniu następujący wzór:

$$\beta_x = \frac{V_L + 2,38\ V_{3,x}}{V_L + 2,38 \int_{t_d - t}^{t_x} V_{3,\alpha,t} dt} \tag{20}$$

Dla temperatury $t_x \leq t_k$ wskaźnik utlenienia węgla osiąga wartość końcową $\beta_x = \beta_k$.

Wartości α_x i β_x zależą od następujących wielkości:

$$\alpha_x = f_1(t_p, B, v, d, t_x) \tag{21}$$

$$\beta_x = f_2(t_p, B, v, d, t_x) \tag{22}$$

gdzie:

t_p - temperatura nasyconego powietrza podmuchowego odpowiadająca wilgoci w_p,

B - jednostkowe obciążenie rusztu (stosunek ilości paliwa doprowadzanego do czadnicy w godzinię do powierzchni przekroju szybu czadnicy), w $kg/(m^2h)$,

d - przeciętna średnica ziaren paliwa.

Temperatura t_p określa stosunek ilości pary wodnej do ilości suchego powietrza wdmuchiwanego pod ruszt czadnicy [7]. Wielkość B charakteryzuje szybkość przepływu gazów reagujących w czadnicy oraz wydajność procesu. Przy rozważaniu najczęściej spotykanego sortymentu węgli kamiennych stosowanych do czadnic tj. groszku I lub II [8] wpływ wielkości d jest stały. Zawartość części lotnych v charakteryzuje w przybliżeniu reakcyjność paliwa, bowiem im paliwo jest geologicznie starsze tym mniej zawiera części lotnych i tym mniejsza na ogół jest jego reakcyjność [3,10]. Dla typowych węgli czadnicowych stosowanych w krajowym hutnictwie szkła i żelaza wielkość v jest w przybliżeniu stała. Jeżeli więc przyjmie się, że wpływ wielkości v i d jest stały, wówczas dla typowych węgli kamiennych stosowanych do czadnic otrzymuje się:

$$\alpha_x = f_3(t_p, B, t_x) \tag{23}$$

$$\beta_x = f_4(t_p, B, t_x) \tag{24}$$

Końcowe wartości stopnia rozłożenia pary α i wskaźnika utlenienia węgla β ustalają się w miejscach gdzie $x \geqslant x_k$ (rys.1c). Wielkości te nie zależą wówczas od temperatury t_x:

$$\alpha = f_5(t_p, B) \tag{25}$$

$$\beta = f_6(t_p, B) \tag{26}$$

Rozważania w dalszej części pracy będą dotyczyć funkcji (23), (24), (25) i (26). Funkcje te można praktycznie określić jedynie za pomocą odpowiednich pomiarów.

3. Badania procesu zgazowania

Dla określenia funkcji (23), (24), (25) i (26) można oprzeć się na badaniach polegających na wyznaczaniu składu chemicznego gazów przepływających przez warstwy w czadnicy, w zależności od wielkości t_p, B, i t_x. Skład chemiczny gazu w określonym miejscu x wynika z mieszania się w odpowiednim stosunku gazów powstających w procesach składowych. W przypadku badania czadnicy zasilanej węglem kamiennym gaz przepływający przez warstwy położone na wysokości od x_v do x_w (rys.1b) tzn. w zakresie temperatury od 105 do 850°C, jest mieszaniną produktów procesu odgazowania $V_{2,x}$, produktów procesu zgazowania $V_{3,x}$ i reszty $V_{3,r,x}$ składającej się z N_2, CO_2 i H_2O. Udział objętościowy każdego składnika w gazie przepływającym przez warstwę x można określić za pomocą analizy tego gazu. Chcąc określić udział objętościowy składnika odpowiadający tylko jednemu z procesów składowych należy udział objętościowy takiego składnika otrzymany z pomiarów skorygować uwzględniając wpływ drugiego procesu składowego. Najprościej jednak byłoby badać te procesy oddzielnie. Proces zgazowania można by więc rozpatrywać analizując gazy z czadnicy zasilanej koksem z węgla kamiennego. Koks posiada małą zawartość części lotnych wynoszącą około 1% [13] i w rozważaniach praktycznych można przyjąć, że w czadnicy takiej zachodzi proces czystego zgazowania nie licząc oczywiście procesu suszenia, który przebiega w temperaturach będących poza zakresem od 105 do 850°C. Wyniki badań procesu zgazowania zachodzącego odddzielnie nie pokrywają się jednak z wynikami badań procesu zgazowania z równolegle zachodzącym procesem odgazowania. Jest to następstwem tego, że własności paliwa w czadnicy w zależności od odległości x zmieniają się w obu przypadkach inaczej. Z drugiej strony można by rozpatrywać oddzielny proces odgazowania analizując gazy otrzymywane ze specjalnej komory, w której w sposób przeponowy odbywa się odgazowanie części lotnych węgla kamiennego. Wyniki badań oddzielnego procesu odgazowania paliwa przebiegającego w takiej komorze również nie pokrywają się z wynikami badań procesu odgazowania zachodzącego w czadnicy przy równoległym zgazowaniu tego paliwa. Jest to następstwem tego, że warunki procesu odgazowania są w obu przypadkach inne [14].

Jednak bez znajomości przebiegu jednego z równolegle zachodzących procesów składowych nie można badać drugiego procesu składowego. Dlatego też badania procesu złożonego należy

oprzeć na założeniu, że jeden z procesów składowych zachodzących w czadnicy przebiega odpowiednio do takiego procesu zachodzącego oddzielnie. Opierając się następnie na wynikach badań tego drugiego procesu składowego przebiegającego oddzielnie, można badać pierwszy proces składowy zachodzący w procesie złożonym. Te same badania procesu złożonego można następnie wykorzystać jako badania drugiego procesu składowego przebiegającego w procesie złożonym, przyjmując, że pierwszy proces składowy przebiega odpowiednio do takiego procesu zachodzącego oddzielnie. Wyniki otrzymane przy takich superpozycjach procesów można następnie poddać rachunkowi wyrównawczemu w oparciu o przyjęte kryteria.

Powyżej opisana droga badań jest długa i uciążliwa. Kosztem mniejszej dokładności wyników można by badania uprościć przez przyjęcie, że zbadany proces odgazowania zachodzący oddzielnie przebiega odpowiednio do procesu odgazowania zachodzącego w czadnicy. Należy oczekiwać, że błąd spowodowany takim przyjęciem nie będzie zbyt duży ponieważ jest on dodatkowo zmniejszony przez to, że ilość produktów procesu odgazowania w czadnicy jest około kilka razy mniejsza od ilości produktów zgazowania.

3.1. Czadnica zasilana koksem

W czadnicy zasilanej koksem można praktycznie badać czysty proces zgazowania, jeżeli przyjmie się, że zgazowywany koks składa się tylko z pierwiastka węgla i z obojętnie zachowujących się części mineralnych. Końcowe wartości stopnia rozłożenia pary i wskaźnika utlenienia węgla można badać za pomocą analizy gazu opuszczającego czadnicę. Gaz ten jest odbierany z czadnicy najczęściej przez króciec znajdujący się nad najwyższą warstwą paliwa w szybie. W przypadku gdy za pomocą rozszerzonego aparatu Orsata określane są molowe udziały wodoru $[H_2]_o$ i azotu $[N_2]_o$ w suchym gazie opuszczającym czadnicę, wówczas można wielkość α wyliczać z następującego wzoru:

$$\alpha = \frac{0{,}634}{w_p} \frac{[H_2]_o}{[N_2]_o} \qquad (27)$$

W przypadku gdy mierzona jest wilgoć w_o kg/Nm^3 suchego gazu opuszczającego czadnicę, wówczas można wielkość α wyrazić następująco:

$$\alpha = \frac{w_p V_L + \frac{w_c}{1 - w_c} - w_o V_{o,s}}{w_p V_L} \qquad (28)$$

gdzie:

w_c - wilgoć paliwa doprowadzanego do czadnicy, w kg/(kg pal. rob.),

$V_{o,s}$ - ilość suchego gazu opuszczającego czadnicę, w Nm^3/(kg pal. such).

Uwzględniając we wzorze (28) bilans azotu przedstawiony równaniem

$$0{,}79\ V_L = [N_2]_o\ V_{o,s} \qquad (29)$$

otrzymuje się

$$\alpha = 1 + \frac{w_c}{w_p V_L (1 - w_c)} - \frac{0{,}79}{[N_2]_o} \frac{w_o}{w_p} \qquad (30)$$

Stopień rozłożenia pary α_x odpowiadający warstwie położonej w odległości $x \leq x_w$ wyraża się wzorem:

$$\alpha_x = \frac{0{,}634}{w_p} \frac{[H_2]_x}{[N_2]_x} \qquad (31)$$

lub

$$\alpha_x = 1 - \frac{0{,}79}{[N_2]_x} \frac{w_x}{w_p} \qquad (32)$$

gdzie:

$[H_2]_x$, $[N_2]_x$ - udziały molowe wodoru i azotu w suchym gazie przepływającym przez warstwę paliwa położoną na wysokości x,

w_x - wilgoć gazu przepływającego przez warstwę paliwa położoną na wysokości x, w kg/(Nm^3 such. gazu).

Znając udziały objętościowe $[CO_2]_o$ i $[CO]_o$ w suchym gazie opuszczającym czadnicę można wyliczać wielkość β z następującego wzoru:

$$\beta = \frac{0,5\,[CO_2]_o + [CO]_o}{[CO_2]_o + [CO]_o} \qquad (33)$$

Wzór na wskaźnik utlenienia węgla β_x odpowiadający warstwie położonej w odległości $x \leq x_w$ otrzymuje się ze wzoru (33), jeżeli wielkość $[CO_2]_o$ i $[CO]_o$ zastąpi się odpowiednio przez udziały molowe $[CO_2]_x$ i $[CO]_x$ w suchym gazie przepływającym przez rozważaną warstwę.

Po wykonaniu odpowiedniej ilości pomiarów można przy posłużeniu się wzorami (33) i (27) lub (30) sporządzić wykresy funkcji (26) i (25). W oparciu o takie wykresy można następnie sporządzić wykres funkcji:

$$\alpha = f_7(t_p, \beta) \qquad (34)$$

Za pomocą analizy próbki gazu pobieranej z różnych warstw paliwa o temperaturze t_x, można określić funkcje (23) i (24), które z kolei pozwalają wyznaczyć funkcję:

$$\alpha_x = f_8(t_p, B, \beta_x) \qquad (35)$$

Wykreślne przedstawienie funkcji (35) polegałoby na wykonaniu szeregu wykresów tej funkcji, dla sporządzenia których należałoby zakładać stałe wartości t_p lub B.

3.2. Czadnica zasilana węglem kamiennym, z pojedynczym odbiorem gazu

Stopień rozłożenia pary wodnej w gazie przepływającym przez warstwę paliwa można mierzyć stosunkiem ilości wodoru powstałego w procesie zgazowania do ilości wodoru wniesionego przez wilgoć powietrza podmuchowego. W czadnicy zasilanej węglem kamiennym wodór powstaje w procesie zgazowania i odgazowania. Dla określenia ilości wodoru powstałego w procesie zgazowania należy od całej ilości wodoru w gazie odjąć ilość wodoru powstałą w procesie odgazowania. Stopień rozłożenia pary α_x odpowiadający warstwie paliwa o temperaturze t_x wyraża się wzorem:

$$\alpha_x = \frac{[H_2]_x V_{x,s} - (H_2)_{2,x} V_{2,x}}{\frac{22,42}{18} w_p V_L} \qquad (36)$$

gdzie:

$[H_2]_x$ - udział molowy wodoru w suchym gazie przepływającym przez warstwę paliwa położoną na wysokości x,

$(H_2)_{2,x}$ - udział molowy wodoru w gazie powstającym w procesie odgazowania w zakresie temperatur od t_x do 850^oC, (dla $t_x > 850^oC$, $(H_2)_{2,x} = 0$),

$V_{x,s}$ - ilość suchego gazu przepływającego przez warstwę paliwa położoną na wysokości x.

Dla wyeliminowania wielkości $V_{x,s}$ ze wzoru (36) można posłużyć się bilansem azotu. Ilość azotu zawartego w gazie przepływającym przez warstwę położoną na wyskości x równa się sumie ilości azotu wniesionego do czadnicy przez powietrze podmuchowe oraz ilości azotu wydzielonego z paliwa w procesie odgazowania. Tę ostatnią ilość można w bilansie pominąć, ponieważ jest ona mała w porównaniu z pozostałymi ilościami. Równanie bilansu azotu przyjmuje wówczas następującą postać:

$$V_{x,s}[N_s]_x = 0,79\ V_L \qquad (37)$$

gdzie:

$[N_2]_x$ - udział molowy azotu w suchym gazie przepływającym przez warstwę paliwa położoną na wysokości x.

Po uwzględnieniu równania (37) we wzorze (36) otrzymuje się:

$$\alpha_x = \frac{0{,}634}{w_p} \frac{[H_2]_x}{[N_s]_x} - \frac{0{,}803\,(H_2)_{2.x} V_{2.x}}{w_p\, V_L} \qquad (38)$$

Jeżeli mierzona jest wilgoć w_x (dla $x \leqslant x_w$), wówczas wielkość α_x można wyrazić następująco:

$$\alpha_x = \frac{w_p V_L - w_x V_{x.s} + \frac{18}{22{,}42}(H_2O)_{2.x}\, V_{2.x}}{w_p\, V_L} \qquad (39)$$

skąd po uwzględnieniu zależności (37) oraz po przekształceniu otrzymuje się

$$\alpha_x = 1 - \frac{0{,}79}{[N_2]_x} \frac{w_z}{w_p} + \frac{0{,}803\,(H_2O)_{2.x}\, V_{2.x}}{w_p\, V_L} \qquad (40)$$

Wartość końcową stopnia rozłożenia pary α określa wzór:

$$\alpha = \frac{[H_2]_o\, V_{o.s} - (H_2)_2\, V_2}{\frac{22{,}42}{18}\, w_p\, V_L} \qquad (41)$$

skąd po uwzględnieniu zależności (29) oraz po przekształceniu otrzymuje się:

$$\alpha = \frac{0{,}634\,[H_2]_o}{w_p [N_2]_o} - \frac{0{,}803\,(H_2)_2\, V_2}{w_p\, V_L} \qquad (42)$$

Jeżeli mierzona jest wilgoć w_c gazu opuszczającego czadnicę, wówczas dogodnie jest obliczać wartość α w następujący sposób:

$$\alpha = \frac{w_p V_L - w_o V_{o,s} + \frac{w_c}{1 - w_c} + \frac{18}{22,42} (H_2O)_2 V_2}{w_p V_L} \quad (43)$$

skąd po uwzględnieniu zależności (29) oraz po przekształceniu otrzymuje się:

$$\alpha = 1 - \frac{0,79}{[N_2]_o} \frac{w_o}{w_p} + \frac{w_c}{w_p V_L (1 - w_c)} + \frac{0,803 (H_2O)_2 V_2}{w_p V_L} \quad (44)$$

Wskaźnik utlenienia węgla β_x można wyliczać ze wzoru (18), w którym

$$\delta_x = \frac{0,79 V_L [CO_2]_x - [N_2]_x (CO_2)_{2,x} V_{2,x}}{0,79 V_L [CO]_x - [N_2]_x (CO)_{2,x} V_{2,x}} \quad (45)$$

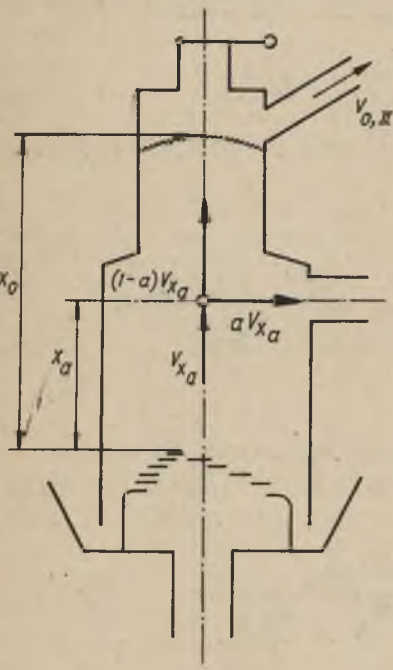
Końcową wartość wskaźnika utlenienia węgla β można wyliczyć za pomocą wzoru (18) jeżeli w miejsce δ_x wstawi się wartość

$$\delta = \frac{0,79 V_L [CO_2]_o - [N_2]_o (CO_2)_2 V_2}{0,79 V_L [CO]_o - [N_2]_o (CO)_2 V_2} \quad (46)$$

Wzory (45) i (46) nie są ścisłe ponieważ wykorzystano w nich równanie (37) przedstawiające uproszczony bilans azotu. W oparciu o wyżej wyprowadzone wzory można przy odpowiednich pomiarach określić funkcję (34) i (35) dla czadnic z pojedynczym odbiorem gazu, zasilanych węglem kamiennym.

3.3. Czadnica zasilana węglem kamiennym. z podwójnym odbiorem gazu

Schemat czadnicy z podwójnym odbiorem gazu przedstawiono na rysunku 2. Dolnym króćcem czadnicy odbierana jest część a ilości V_{x_a} gazu przepływającego przez warstwę paliwa znajdującego się na wysokości $x = x_a$. Część gazu $(1-a)V_{x_a}$ przechodzi do górnej części czadnicy dostarczając ciepła do procesu odgazowania i suszenia paliwa. Wielkość x_a mieści się zazwyczaj w przedziale od x_v do x_w. Dla zakresu od x_v do x_a stopień rozłożenia pary α_x można określać za pomocą wzorów (38) lub (40), natomiast wskaźnik utlenienia węgla β_x w tym zakresie można określać wzorami (18) i (45).



Rys.2. Schemat czadnicy z podwójnym odbiorem gazu

Dla x zawartego w przedziale od x_a do x_w stopień rozłożenia pary α_x przedstawia się następująco:

$$\alpha_x = \frac{0,634}{w_p}\frac{[H_2]_x}{[N_2]_x} - \frac{(H_2)_{2,x}V_{2,x} + a(H_2)_{2,x_a}V_{2,x_a}}{1,245\,(1-a)\,w_p V_L} \tag{47}$$

lub gdy jest mierzona wilgoć w_x

$$\alpha_x = 1 - \frac{0,79}{[N_2]_x}\frac{w_x}{w_p} + \frac{(H_2O)_{2,x}V_{2,x} - a(H_2O)_{2,x_a}V_{2,x_a}}{1,245\,(1-a)\,w_p V_L} \tag{48}$$

Końcowa wartość stopnia rozłożenia pary α wyraża się wzorem:

$$\alpha = \frac{0,634}{w_p}\frac{[H_2]_o}{[N_2]_o} - \frac{[H_2]_2 V_2 + a(H_2)_{2,x_a} V_{2,x_a}}{1,245\,(1-a)\,w_p V_L} \qquad (49)$$

lub gdy mierzona jest wilgoć w_o

$$\alpha = 1 - \frac{0,79}{N_{2\,o}}\frac{w_o}{w_p} + \frac{w_c}{w_p V_L (1-w_c)} + \frac{(H_2O)_2 V_2 - a(H_2O)_{2,x_a} V_{2,x_a}}{1,245\,(1-a) w_p V_L} \qquad (50)$$

Wskaźnik utlenienia węgla β_x dla wartości x zawartej w przedziale od x_a do x_w można obliczyć wzorem (18), w którym

$$\delta_x = \frac{(1-a)0,79\,V_L[CO_2]_x - [N_2]_x\left[(CO_2)_{2,x}V_{2,x} + a(CO_2)_{2,x_a}V_{2,x_a}\right]}{(1-a)0,79\,V_L[CO]_x - [N_2]_x\left[(CO)_{2,x}V_{2,x} + a(CO)_{2,x_a}V_{2,x_a}\right]} \qquad (51)$$

Końcową wartość wskaźnika utlenienia węgla β można wyliczać za pomocą wzoru (18) jeżeli w miejsce δ_x wstawi się wartość

$$\delta = \frac{(1-a)0,79\,V_L[CO_2]_o - [N_2]_o\left[(CO_2)_2V_2 + a(CO_2)_{2,x_a}V_{2,x_a}\right]}{(1-a)0,79\,V_L[CO]_o - [N_2]_o\left[(CO)_2V_2 + a(CO)_{2,x_a}V_{2,x_a}\right]} \qquad (52)$$

W powyższych wzorach dla czadnicy z podwójnym odbiorem gazu wykorzystano uproszczony bilans azotu dla wyeliminowania wielkości $V_{x,s}$.

Dla określenia wielkości a można rozważyć dwie czadnice; jedna z pojedynczym, druga z podwójnym odbiorem gazu,

zasilane węglem kamiennym o takich samych wartościach wilgoci w_c, zawartości części lotnych v i o takim samym sortymencie. Temperatura t_p nasyconego powietrza podmuchowego oraz jednostkowe obciążenie rusztu B dla obu czadnic ma taką samą wartość. Jeżeli równania bilansu energetycznego sporządzone dla obu czadnic doda się stronami i jeżeli przyjmie się, że ciepła właściwe gazów opuszczających czadnice są równe oraz, że straty ciepła na rzecz otoczenia w obu przypadkach są takie same, wówczas otrzymuje się następujące wyrażenie:

$$a\, V_{x_a}\, t_{g,x_a} = V_{o,I}\, t_{g,o,I} - V_{o,II}\, t_{g,o,II} \tag{53}$$

gdzie:

V_{x_a}, t_{g,x_a} - ilość w $Nm^3/(kg\ pal.\ such.)$ i temperatura wilgotnego gazu dopływającego do warstwy paliwa położonej na wysokości x_a,

$V_{o,II}$, $t_{g,o,II}$ - ilość w $Nm^3/(kg\ pal.\ such.)$ i temperatura wilgotnego gazu otrzymywanego przez górny króciec czadnicy z podwójnym odbiorem gazu,

$V_{o,I}$, $t_{g,oI}$ - ilość w $Nm^3/(kg\ pal.\ such.)$ i temperatura wilgotnego gazu opuszczającego czadnicę z pojedynczym odbiorem gazu.

Jeżeli przyjmie się, że ilość V_L powietrza dla obu czadnic jest w przybliżeniu taka sama, wówczas można wykorzystać przybliżone równania bilansu azotu:

$$0{,}79\, V_L = V_{x_a} (N_2)_{x_a} = V_{o,I} (N_2)_{o,I} \tag{54}$$

gdzie:

$(N_2)_{x_a}$, $(N_2)_{o,I}$ - udziały molowe azotu w wilgotnym gazie opuszczającym czadnicę z pojedynczym odbiorem gazu oraz w wilgotnym gazie dopływającym do warstwy paliwa położonej na wysokości x_a.

Jeżeli następnie przyjmie się, że ilość gazu otrzymywanego w czadnicy z pojedynczym odbiorem jest w przybliżeniu równa ilości gazu otrzymywanego w czadnicy z podwójnym odbiorem:

$$V_{o,I} = a\, V_{x_a} + V_{o,II} \qquad (55)$$

wówczas po wstawieniu zależności (54) i (55) do (53) otrzymuje się wzór:

$$a = \frac{(N_2)_{x_a}}{(N_2)_{o,I}} \; \frac{t_{g,o,I} - t_{g,o,II}}{t_{g,x_a} - t_{g,o,II}} \qquad (56)$$

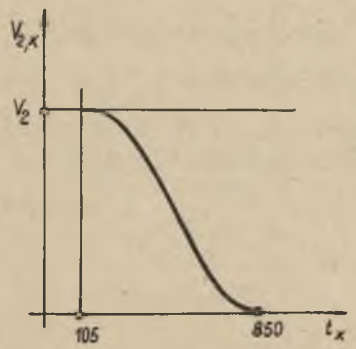
Za pomocą wzoru (56) można określać wielkość a jeżeli znane są odpowiednie wartości $t_{g,o,I}$ i $(N_2)_{o,I}$ dla gazu opuszczającego czadnicę z pojedynczym odbiorem.

4. Badania procesu odgazowania

Jak wynika ze wzorów wyprowadzonych w punkcie 3, badanie procesu odgazowania pod kątem widzenia procesu czadnicowego, polegają na określeniu wielkości $V_{2,x}$, $(H_2)_{2,x}$, $(H_2O)_{2,x}$, $(CO_2)_{2,x}$, $(CO)_{2,x}$ w zależności od temperatury t_x paliwa przy określonych warunkach. Na podstawie wyników takich badań można na przykład określić zależność

$$V_{2,x} = f_9(t_x) \qquad (57)$$

przedstawioną jakościowo na rysunku 3. W literaturze [2,4,5,11, 12,14] podano wyniki badań prze-



Rys.3. Wydajność procesu odgazowania

prowadzonych w celu określenia takich zależności dla procesu odgazowania przebiegającego oddzielnie. Wyniki tych badań można wykorzystać przy posługiwaniu się wzorami wyprowadzonymi w niniejszej pracy, jeżeli przyjmie się, że odpowiadają one procesowi odgazowania zachodzącemu w czadnicy przy równocześnie przebiegającym procesie zgazowania.

5. Przykład obliczenia

W czasie pomiarów cieplnych czadnicy z podwójnym odbiorem gazu zasilanej węglem kamiennym o wilgoci całkowitej $w_c = 11,5\%$ i zawartości tlenu $o = 11,5\%$ otrzymano następujące dane: temperatura nasyconego powietrza podmuchowego $t_p = 55^oC$ (wartości tej odpowiada $w_p = 0,153$ kg/Nm^3), ilość suchego powietrza doprowadzanego do czadnicy $V_L = 2$ Nm^3/kg, wilgoć gazu odbieranego górnym króćcem $w_o = 0,134$ kg/Nm^3 oraz udział molowy azotu w tym gazie $[N_2]_o = 44,6\%$, wilgoć gazu odbieranego dolnym króćcem $w_{x_a} = 0,030$ kg/Nm oraz udział molowy azotu w tym gazie $[N_2]_{x_a} = 54,0\%$. Końcową wartość stopnia rozłożenia pary α można obliczyć ze wzoru (50). We wzorze tym występuje iloczyn $(H_2O)_2V_2$ przedstawiający ilość wilgoci pirogenetycznej dającej się obliczyć za pomocą wzoru (7):

$$(H_2O)_2V_2 = 0,77\ o = 0,77.0,115 = 0,0886 \quad \text{kg/(kg pal.such.)}$$

Przy temperaturze $t_{g,x_a} = 645^oC$ gazu odbieranego dolnym króćcem czadnicy można przyjąć orientacyjnie, że $V_{2,x_a} = 0,04$ Nm^3/(kg pal.such.). Przyjmując następnie $a = 0,78$ oraz udział molowy pary wodnej $(H_2O)_{2,x_a} = 18\%$ w produktach odgazowania w zakresie temperatur paliwa od 850^oC do $t_x \approx t_{g,x_a}$, otrzymuje się

$$\alpha = 1 - \frac{0.79}{0,446}\ \frac{0.134}{0,153} + \frac{0.115}{0,153.2(1-0,115)} +$$

$$+ \frac{0,0886 - 0,78.0,18.0,04}{1,245(1-0,78)0,153.2} = 0,857$$

Stopień rozłożenia pary α_{x_a} w gazie odbieranym dolnym króćcem można obliczyć za pomocą wzoru (40):

$$\alpha_{x_a} = 1 - \frac{0,79}{0,54}\,\frac{0,030}{0,153} + \frac{0,803.0,18.0,04}{0,153.2} = 0,732$$

W powyższym przykładzie różnica między wartościami stopnia rozłożenia pary w gazie odbieranym górnym i dolnym króćcem wynosi: 85,7 - 73,2 = 12,5%.

Rękopis złożono w Redakcji w dniu 1.II.1963 r.

LITERATURA

[1] I. Chanin, W. Juszyn - Bilans materiałowy i bilans cieplny pieców koksowniczych, PWT 1952.

[2] A. Ihnatowicz - Badania nad grupami tlenowymi w węglu kamiennym, Prace Głównego Instytutu Górnictwa, Kom. nr 125, PWT 1952.

[3] D. W. Van Krevelen - Coal, 1961.

[4] H. H. Lowry Edit. - Chemistry of coal utilization, New York 1945, t.I, str.834-847, (Dependence of yields of products on temperature and rate of heating).

[5] J. Nadziakiewicz, A. Kijewska - Badania przebiegu odgazowania węgla w czasie koksowania, Prace Głównego Instytutu Górnictwa, Kom.nr 85, PWT 1952.

[6] R. Petela - Ilość wody pogazowej otrzymywanej w czadnicy z podwójnym odbiorem gazu, Problemy Projektowe 1962, str. 179, nr 6.

[7] R. Petela - Parametry pary nawilżającej powietrze wdmuchiwane do czadnic, Problemy Projektowe 1962, str. 261, nr 9.

[8] R. Petela - Wielkości charakteryzujące proces czadnicowy przy podmuchu powietrzno-parowym, Problemy Projektowe 1963 (w druku).

[9] Poradnik Koksochemika t.I, PWT 1951.

[10] B. Roga - Węgiel kamienny, przeróbka i użytkowanie, PWT 1954.

[11] B. Roga, A. Ihnatowicz - Badania nad przebiegiem odgazowania różnych typów paliw naturalnych, Przegląd Górniczy 1956, nr 10, Biuletyn Głównego Instytutu Górnictwa nr 3.

[12] B. Roga, L. Wnękowska, A. Ihnatowicz - Chemia węgla, PWT 1955.

[13] A. Szpilewicz, B. Kalinowski - Koksownictwo, WGH 1961.

[14] W. Świętosławski - Fizykochemia węgli kamiennych i procesu koksownia, PWT 1953.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ПАРО-ВОЗДУШНОМ ДУТЬЕ

Резюме

В статье проведен анализ газогенераторного процесса происходящего в газогенераторе работающем на каменном угле при дутье ниского давления смеси воздуха и водяного пара. Рассмотрено количество газа, получаемого в газогенераторе в результате трех составных процессов: сушки, удаления летучих и газифицирования. Приведено степень разложения водяного пара α, показатель окисления угля β, а также методы исследования этих значений на основании анализа состава генераторного газа.

METHODS OF EXAMINING THE GAUGES FOR GAS PRODUCER PROCESSES WITH AN AIR AND STEAM BLAST

Summary

The author have analysed the gas producer process running on in the gas producer when the coal is supplied and a mixture of air and steam is blown in under low pressure. There are considered the quantities of the gases obtained in result of three component processes, viz. drying, distillation of volatile matter and the gasification of carbon. There are discussed the decomposition grade of steam α, the oxygenation gauge of carbon β, and the methods for determining these values based on the examination of the composition of the obtained gases.