ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1990

Seria: ENERGETYKA z. 108 Nr kol. 1040

Kazimierz KURPISZ
Jan SKŁADZIEŃ
Krzysztof WILK

Instytut Techniki Cieplnej
Politechniki Śląskiej

WPŁYW WYBRANYCH SKŁADNIKÓW WYSOKOTEMPERATUROWYCH ZJONIZOWANYCH SPALIN NA ICH ENTALPIĘ I ENTROPIĘ

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń entalpii i entropii wysokotemperaturowych zjonizowanych spalin znajdujących się w stanie równowagi chemicznej. Uwzględniono jedynie gazowe produkty spalania i przyjęto, że zachowują się one jak gazy półdoskonałe. Zbadano wpływ obecności wybranych substancji składnikowych spalin na rozpatrywane parametry kaloryczne.

1. Wstęp

Wyznaczanie składu równowagowego wysokotemperaturowych zjonizowanych spalin stanowi jeden z podstawowych problemów przy projektowaniu instalacji oraz planowaniu eksperymentów z generatorem MHD. Znajomość zależności parametrów kalorycznych i przewodności elektrycznej spalin od ich temperatury i ciśnienia jest niezbędna dla określenia podstawowych parametrów pracy układu, do których należą: temperatura podgrzania powietrza, ciśnienie w komorze spalania, wstępny stosunek nadmiaru powietrza, udział posiewu w spalinach, prędkość spalin w kanale roboczym MHD [1, 2]. Informacje literaturowe dotyczące problematyki wyznaczania składu zjonizowanych spalin nie są zbyt obszerne, mimo iż w związku z tym prowadzonych było wiele prac. W szczególności brak jest danych na temat wpływu liczby i rodzaju uwzględnianych w obliczeniach składników spalin na ich właściwości kaloryczne i elektryczne.

Określenie liczby i postaci składników spalin mających istotny wpływ na ich parametry kaloryczne i przewodność elektryczną może mieć istotne znaczenie przy wykonywaniu wielowariantowych obliczeń związanych z wysokotemperaturowym członem: komora spalania - generator MHD. Wzrost liczby składników spalin uwzględnianych w analizie powoduje wydłużenie czasu obliczeń przy określaniu składu równowagowego. W sytuacji gdy skład ten jest określany wiele razy problem powyższy zaczyna być istotny. Ma to miejsce [1, 2] np. w przypadku dobierania parametrów pracy wysokotemperaturowej komory spalania, co jest związane z wielokrotnym sporządzaniem

wykresów i, s dla wysokotemperaturowych spalin. Z drugiej strony bardzo dokładne wyznaczanie entalpii i entropii spalin w warunkach technicznych nie jest wskazane, gdyż część parametrów pracy układu można określić jedynie w sposób szacunkowy. Należy do nich np. wskaźnik strat ciepła w komorze spalania. Powstaje w związku z tym problem rozsądnego kompromisu pomiędzy dokładnością obliczeń rozpatrywanych parametrów kalorycznych spalin oraz czasem pracy komputera. Wiąże się to z liczbą składników spalin uwzględnianych w rozważaniach.

Celem niniejszego opracowania jest określanie wpływu wybranych substancji, przez uwzględnienie ich na liście produktów tworzących spaliny, na entalpię i entropię tych spalin przy różnych wartościach parametrów termicznych. Wyniki przeprowadzonych obliczeń mogą być pomocne przy tworzeniu kompleksowej procedury obliczeniowej dla układu komora spalania - generator MHD, zawierającej podprogram do wyznaczania równowagowego składu spalin.

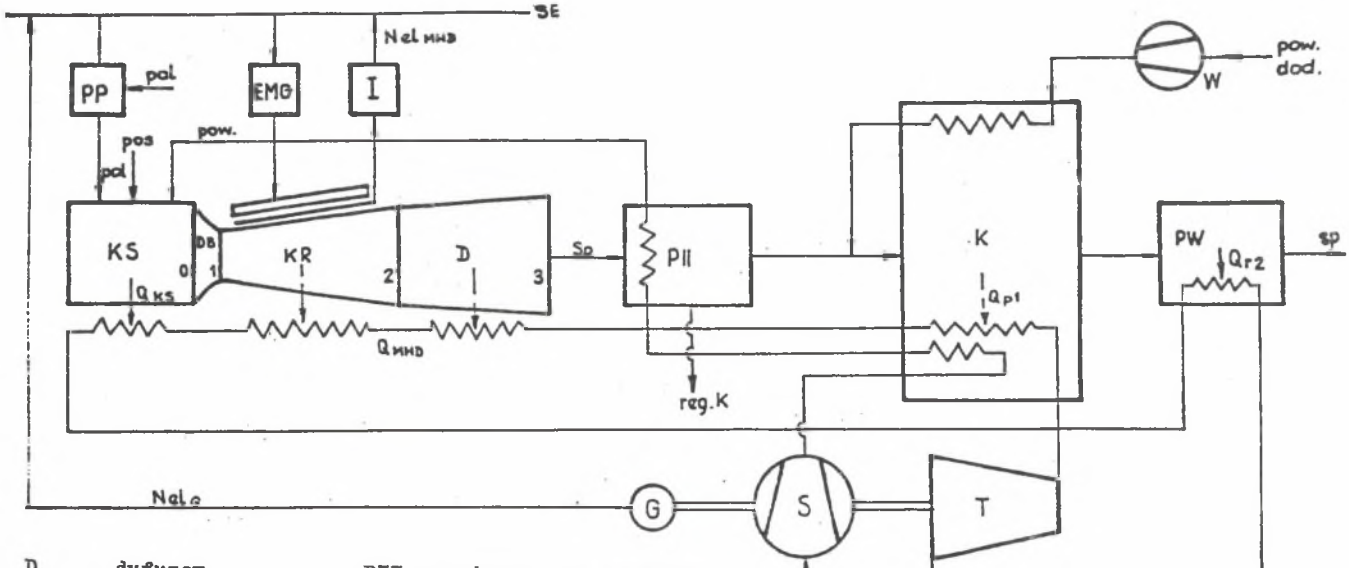
Wyniki prezentowanych badań mają zastosowanie jednak nie tylko w pracach związanych z instalacją MHD, ale mogą być również przydatne do analizy innych roztworów gazowych w temperaturze wyższej od 2000 K.

2. Opis instalacji MHD-parowej

Uproszczony schemat instalacji elektrowni kombinowanej MHD-parowej pokazano na rys. 1. W schemacie tym wyróżnić można dwa człony. Człon wysokotemperaturowy obejmuje wysokotemperaturową komorę spalania (KS), dyszę rozprężającą (DB), kanał roboczy MHD (KR), dyfuzor (D) i podgrzewacze powietrza II stopnia (PII). W części klasycznej elektrowni znajduje się natomiast kocioł parowy z podgrzewaczami wody oraz typowa maszynownia.

Do komory spalania doprowadzane jest paliwo, utleniacz, a w końcowej części komory dodatkowo posiew jonizujący. Paliwem może być pył węgla kamiennego (komora jest wtedy cyklonowa) lub gaz. W charakterze utleniacza stosować można powietrze atmosferyczne [3, 4] lub powietrze wzbogacone w tlen [5]. Stosunek nadmiaru tlenu powinien wynosić około 0,9 z uwagi na maksimum temperatury spalin. Zadaniem posiewu jonizującego jest zapewnienie wymaganego stopnia jonizacji spalin dla możliwych do uzyskania w instalacji przemysłowej wartości temperatury. W związku z tym powinna to być substancja o stosunkowo niskim potencjale jonizacji. Przewiduje się, że w charakterze posiewu stosowany będzie potas doprowadzany w postaci wodnego roztworu węglanu K_2CO_3.

Komorę spalania opuszczają zjonizowane spaliny o temperaturze 2500÷÷3000 K, a w przypadku zastosowania węgla jako paliwa, także ciekły żużel. Spaliny są następnie przyspieszane w dyszy Bendemanna do prędkości 800÷1400 m/s [3, 4, 5]. Poruszając się z tak dużą prędkością w polu magnetycznym kanału roboczego formują one prąd elektryczny. Gęstość wytwarzanej mocy elektrycznej jest wprost proporcjonalna do iloczynu kwadratu



D - dyfuzor
DB - dysza Bendemanna
EMG - elektromagnes
G - generator elektryczny
I - inwertor
K - kocioł parowy
KR - kanał roboczy
KS - komora spalania
PII - podgrzewacz powietrza II stopnia
PP - przygotowanie paliwa
PW - podgrzewacz wody
S - sprężarka
SE - sieć elektroenergetyczna
T - turbina parowa
W - wentylator powietrza

Rys. 1. Schemat instalacji elektrowni kombinowanej MHD-parowej

Fig. 1. System diagram of combined MHD-steam power plant

prędkości i przewodności elektrycznej spalin [2]. W inwertorze I generowany prąd stały transformowany jest na prąd o zmiennym napięciu.

Spaliny rozprężają się w kanale roboczym do ciśnienia około 0,05÷0,1 MPa. Aby zapewnić ich prawidłowy przepływ przez podgrzewacze oraz część konwencjonalną elektrowni spręża się je w dyfuzorze do ciśnienia około 0,115 MPa [3, 5].

W kotle K spaliny opuszczające część wysokotemperaturową elektrowni są dopalane w doprowadzanym dodatkowo powietrzu. Maszynownia elektrowni nie różni się w zasadzie od maszynowni klasycznej elektrowni parowej.

Przewiduje się, że ze względów eksploatacyjnych ściany urządzeń członu wysokotemperaturowego elektrowni będą chłodzone wodą wykorzystywaną następnie w obiegu parowym elektrowni. Temperatura podgrzania powietrza do spalania wynosić ma ~ 1800 K [3]. Wysoka temperatura podgrzania utleniacza jest konieczna ze względu na żądaną temperaturę spalin w kanale roboczym MHD. Podgrzanie powietrza atmosferycznego do podanej temperatury jest jednym z trudniejszych problemów konstrukcyjnych. Wymaga bowiem, przy zasilaniu rekuperatorów spalinami z posiewem, specjalnych wypełniaczy ceramicznych niewrażliwych na działanie ciekłego posiewu. Rozważa się w związku z tym w pewnych instalacjach możliwość wykorzystania autonomicznych podgrzewaczy opalanych gazem. To rozwiązanie jest jednak mniej atrakcyjne, jeśli wziąć pod uwagę efektywność wykorzystania energii paliwa.

Z uwagi na znaczny koszt posiewu jonizującego przewiduje się jego odzyskiwanie. Z podgrzewacza PII skroplony posiew odprowadzany będzie do instalacji regenerującej. Dodatkowym walorem takiego obiegu posiewu w urządzeniu jest fakt, że posiew wiąże prawie całą siarkę zawartą w spalinach, w instalacji do odzyskiwania posiewu wytwarzany jest natomiast siarczan wapnia.

Podstawowe korzyści płynące z zastosowania generatorów MHD w elektrowniach parowych to wykorzystanie dużej różnicy temperatur między spalinami a czynnikiem obiegowym, co zapewnia sprawność sięgającą 51÷55% [3, 5] oraz duża czystość spalin.

3. Składniki spalin wysokotemperaturowych

W warunkach termicznych panujących w wysokotemperaturowej części elektrowni MHD-parowej spaliny zawierają dużą liczbę składników tworzących rzeczywisty roztwór heterogeniczny. Liczba produktów uwzględnianych w składzie spalin jest różna w różnych opracowaniach i waha się od 13 do 170 [6, 7, 8, 9]. W ścisłych teoretycznych rozważaniach może być uzasadnione uwzględnienie takiej liczby elementów. W obliczeniach technicznych postępowanie takie, jak już wspomniano, jest niecelowe i nieefektywne. Produkty, których udziały są bardzo małe, tj. mniejsze niż 10^{-3}, nie mają istotnego wpływu na entalpię i entropię spalin. Pominięcie ich zatem nie

wpływa znacząco na wyniki bilansowania poszczególnych elementów urządzenia. Ich uwzględnianie jest ewentualnie wskazane tylko wówczas, gdy ze względu na niski potencjał jonizacji albo bardzo duży przekrój na zderzenia z elektronami wpływają one silnie, mimo małych udziałów, na przewodność elektryczną spalin.

Najważniejsze ciekłe składniki spalin pochodzą z popiołu - wg [5, 6] są to: Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO. Ponadto niewielkie ilości produktów ciekłych powstają w wyniku reakcji, w które wchodzi potas. Należą do nich: K_2SiO_3, K_2SO_4 i w niższej temperaturze KOH [8, 9]. W pracy [8] uwzględniono 7 ciekłych i 49 gazowych produktów spalania.

Całkowite wyeliminowanie fazy ciekłej ze spalin nie jest technicznie możliwe. Przewiduje się [4, 5], że z dwustopniowej cyklonowej komory spalania zasilanej paliwem węglowym będzie można w warunkach przemysłowych odprowadzać 85÷90% żużla w postaci ciekłej. Pozostała jego część (w fazie ciekłej) będzie unoszona przez spaliny. Gdyby komorę spalania opuszczały spaliny składające się wyłącznie z gazowych produktów, to przy spadku temperatury od ok. 3000 K do 2200÷2300 K, jaki ma miejsce w kanale MHD, może również wystąpić kondensacja niektórych składników spalin. Na ścianach kanału natomiast może nawet dojść do ich zestalenia. Powyższe zjawiska są możliwe mimo znacznego spadku ciśnienia towarzyszącego przepływowi spalin przez kanał. Udział fazy ciekłej w masie spalin jest bardzo mały. W przewidywanych do utylizacji w elektrowni MHD-parowej węglach kamiennych popiół stanowi do 7% masy. Jeśli jest on odprowadzany w postaci ciekłej w ilości 85%, a do spalenia jednego kilograma paliwa potrzeba ok. 9 kg powietrza atmosferycznego, to w rezultacie masa ciekłego żużla stanowi ~ 0,1% masy spalin. Oznacza to, że we wstępnych analizach można pominąć wpływ fazy ciekłej na skład spalin i ich parametry kaloryczne.

4. Założenia modelu

Biorąc pod uwagę powyższe rozważania oraz zakresy zmian temperatury (3500÷2000 K) i ciśnienia (1,25÷0,05 MPa) spalin, mające znaczenie dla przemysłowej elektrowni z generatorem MHD, przyjęto powszechnie stosowane we wstępnych obliczeniach instalacji MHD założenia:

1. Spaliny są roztworem homogenicznym (gazowym) i wpływ produktów pochodzących z popiołu na rozpatrywane parametry jest znikomy.
2. Wszystkie składniki spalin zachowują się jak gazy półdoskonałe (roztwór jest doskonały).
3. Spośród wszystkich gazowych składników spalin wystarczy uwzględnić obecność tych, które ze względu na ilości w jakich występują widocznie wpływają na kaloryczne właściwości spalin.
4. Składniki spalin są ze sobą w równowadze chemicznej.

Na podstawie danych literaturowych [4, 5, 6] oraz analizy stałych równowagi reakcji, które niezależnie od siebie zachodzą w roztworze, ograniczono liczbę składników spalin do 15 najważniejszych produktów: H, O, K, O_2, OH, NO, N_2, H_2, CO, CO_2, H_2O, KOH, Ar, SO_2, KO. Pominięto, zgodnie z założeniem 3, wszystkie inne składniki spalin, ponieważ występują one w tak małych ilościach, że nie mają praktycznie wpływu na parametry kaloryczne spalin, a należy sądzić, że i na przewodność elektryczną.

W rozważaniach przyjęto roztwór homogeniczny w stanie równowagi chemicznej. Przyjęcie stanu równowagowego w układzie heterogenicznym też nie byłoby ściśle zgodne z rzeczywistością. Ciekły żużel gromadzi się bowiem głównie na ścianach urządzeń, które są częściowo lub całkowicie chłodzone wodą. Inną temperaturę mają zatem produkty gazowe i zawarta w nich zawiesina ciekłego popiołu, inną zaś ciekły żużel w pobliżu ścian. Nie jest tym samym możliwe określenie równowagowego składu heterogenicznych spalin na drodze klasycznej. Trudno przy tym stwierdzić w sposób jednoznaczny czy rozpatrywanie stanu równowagowego izotermicznego układu heterogenicznego daje mniejszy błąd niż pominięcie wpływu popiołu.

5. Wyznaczanie składu równowagowego spalin wysokotemperaturowych

Skład równowagowy spalin wysokotemperaturowych wyznaczano stosując metodę minimalizacji entalpii swobodnej. Zgodnie z założeniami podanymi w punkcie 3 entalpię i entropię spalin uzyskanych z 1 kg paliwa obliczano z zależności

$$i = \sum_{j=1}^{N} n_j (Mi)_j^{\emptyset} , \tag{1}$$

$$s = \sum_{j=1}^{N} n_j (Ms_t)^{\emptyset} - (MR) \sum_{j=1}^{N} n_j \ln \frac{n_j}{n} p_w , \tag{2}$$

gdzie:

i - entalpia spalin, kJ/kg_p,

s - entropia spalin, $kJ/(kg_p \cdot K)$,

n_j - liczba kilomoli j-tego składnika spalin powstająca ze spalenia 1 kg paliwa, $kmol/kg_p$,

$n = \sum_{j=1}^{N} n_j$; N - liczba składników spalin,

$(Mi)_j^{\emptyset}$ - właściwa kilomolowa entalpia całkowita składnika j, uwzględniająca entalpię chemiczną w warunkach standardowych, kJ/kmol,

$(Ms_t)_j^{\emptyset}$ - właściwa kilomolowa entropia składnika j w danej temperaturze i pod ciśnieniem normalnym p_n, uwzględniająca entropię chemiczną w warunkach standardowych oraz izobaryczny przyrost entropii, kJ/(kmol·K),

$p_w = \frac{p}{p_n}$ - ciśnienie względne spalin; p - ciśnienie rzeczywiste spalin.

Przyjęto poziom odniesienia związany z warunkami:

$$p_n = 101\ 325\ \text{Pa}, \qquad T = 0\ \text{K}.$$

Entalpia właściwa $(Mi)_j^{\emptyset}$ jest równa sumie właściwej entalpii fizycznej oraz właściwej entalpii chemicznej. Za tę ostatnią przyjęto entalpię tworzenia czystego składnika j. Entalpia swobodna może być zapisana w sposób następujący:

$$G = i - T\cdot s = \sum_{j=1}^{N} n_j \left\{(Mi)_j^{\emptyset} - T\left[(Ms_t)_j^{\emptyset} - (MR)\ \ln \frac{n_j}{n} p_w\right]\right\} . \tag{3}$$

Wyznaczanie składu równowagowego polegało na znalezieniu takich wartości n_j, dla $n = 1,2,\ldots,N$, dla których funkcja (3) osiąga minimum:

$$G(n_1, n_2,\ldots,n_N) \qquad \min,$$

przy równoczesnym spełnieniu ograniczeń wynikających z liniowych równań bilansu pierwiastków i warunków nieujemności udziałów. W rozpatrywanym przypadku pierwiastków jest siedem: C, S, H_2, O_2, N_2, Ar, K, a zatem i równań - ograniczeń jest siedem. Liczba ograniczeń nierównościowych typu $n_j > 0$ jest natomiast równa liczbie aktualnie uwzględnianych składników spalin.

W literaturze opisanych jest wiele metod służących do rozwiązywania tego typu zagadnień. Jednak złożona postać funkcji G ogranicza na ogół możliwości stosowania większości z nich do szczególnych przypadków, takich jak np. określony przedział temperatury czy ciśnienia. Na podstawie licznych przeprowadzonych prób wydaje się, że najkorzystniejsza spośród metod gradientowych jest metoda gradientu sprzężonego z rzutowaniem, a wśród metod bezgradientowych metoda Neldera-Meada [11]. Wyniki prezentowane w niniejszym opracowaniu otrzymano za pomocą drugiej z nich. Metoda ta jest stosunkowo efektywna. Po sprzężeniu z metodą Hooke'a-Jeevsa, w pobliżu poszukiwanego minimum funkcji G, pozwala ona z dużą dokładnością wyznaczyć skład spalin. Bardziej szczegółowe informacje dotyczące numerycznych procedur wyznaczania równowagowego składu spalin przedstawiono w pracy [11].

6. Wyniki obliczeń. Wnioski

W punkcie 4 niniejszego opracowania przedstawiono listę piętnastu składników, które w zasadzie należy uwzględniać w składzie wysokotemperaturowych spalin powstających w procesie spalania węgla kamiennego. Jak zaznaczono, produkty nie znajdujące się na tej liście nie powinny mieć znaczenia w obliczeniach technicznych i mogą być pomijane.

Analizę przeprowadzono dla sześciu wariantów. W wariancie pierwszym uwzględniono wszystkich piętnaście składników, tzn.: CO, CO_2, H_2, H, OH, H_2O, O, O_2, KOH, KO, K, NO, N_2, SO_2, Ar. W pozostałych wariantach eliminowano z powyższej listy odpowiednio:

w wariancie 2 - KOH,
w wariancie 3 - KO,
w wariancie 4 - NO,
w wariancie 5 - KOH, KO,
w wariancie 6 - KOH, KO, NO.

Obliczenia przeprowadzono dla wagowego udziału posiewu w spalinach [2] $g_p = 0,005$ oraz dla wartości stosunku nadmiaru powietrza [2] $\lambda = 0,95$. Przyjęto skład powietrza doprowadzonego do komory spalania opisany udziałami objętościowymi: azot 0,78; tlen 0,21; argon 0,01. Nie uwzględniono w składzie powietrza dwutlenku węgla gdyż występuje on w ilości, która nie ma praktycznego znaczenia. Założono, że posiew doprowadzany jest w postaci wodnego roztworu węglanu potasu. Udział wagowy K_2CO_3 w roztworze wynosi 50%. Badania przeprowadzono dla paliwa zawierającego wagowo

wodoru	0,048,
tlenu	0,128,
azotu	0,017,
węgla	0,658,
siarki	0,004 (spaleniu ulega 90% siarki),
popiołu	0,045,
wilgoci	0,100.

W tablicach 1 i 2 zestawiono względne wartości otrzymanych różnic pomiędzy entalpią i entropią dla wariantów 2÷6, a entalpia i entropią spalin dla wariantu 1, liczonych wg wzoru:

$$\delta_i = 100(i_m - i_1)/i_1 ,$$

$$\delta_s = 100(s_m - s_1)/s_1 ,$$

gdzie:

$i_m(s_m)$ - entalpia (entropia) spalin dla listy m-tego wariantu, m=2÷6,
$i_1(s_1)$ - entalpia (entropia) spalin dla wariantu pierwszego, przy tych samych wartościach pozostałych parametrów opisujących stan układu jak w wariancie m.

Tablica 1

Różnica względna entalpii wyznaczona dla wariantów 2÷6 listy składników, %

T, [K]	2000			2500			3000			3500		
P_w / Wariant	1,0	6,0	12,5	1,0	6,0	12,5	1,0	6,0	12,5	1,0	6,0	12,5
2	-0,71	-0,67	-0,79	0,50	0,74	0,82	0,07	0,46	0,41	0,08	-0,06	0,26
3	-0,05	0,19	0,24	0,04	0,34	0,27	-0,06	-0,10	-0,05	-0,01	0,09	0,04
4	0,51	0,34	0,26	-5,40	-5,54	-6,43	-3,34	-4,50	-4,61	-0,70	-2,78	-3,40
5	0,68	0,17	0,60	0,72	0,94	0,79	0,09	0,14	0,44	0,06	0,05	0,19
6	-0,12	-0,09	-0,26	-4,99	-5,49	-4,21	-3,24	-4,10	-4,19	-1,55	-2,51	-3,26

Tablica 2

Różnica względna entropii wyznaczona dla wariantów 2÷6 listy składników, %

T, [K]	2000			2500			3000			3500		
P_w / Wariant	1,0	6,0	12,5	1,0	6,0	12,5	1,0	6,0	12,5	1,0	6,0	12,5
2	0,010	0,005	0,007	0,009	0,021	0,026	0,005	0,028	0,020	0,008	0,001	0,026
3	0,001	0,004	0,008	0,000	0,006	0,005	-0,004	-0,007	0,002	0,005	0,016	0,004
4	-0,013	-0,009	-0,007	-0,155	-0,120	-0,121	-0,331	-0,350	-0,328	-0,181	-0,392	-0,443
5	0,009	0,001	0,007	0,015	0,010	0,036	0,007	0,006	0,021	0,005	0,010	0,018
6	-0,006	0,017	-0,009	-0,152	-0,120	-0,090	-0,321	-0,322	-0,314	-0,160	-0,363	-0,431

Wyniki przedstawione w tablicach 1 i 2 wskazują, że pominięcie na liście składników spalin KO lub KOH oraz ewentualnie obu tych związków praktycznie nie wpływa na wartości parametrów kalorycznych. Różnice względne entalpii wahają się w tym przypadku w przedziale 0,01÷1%, przy czym wartości powyżej 0,5% pojawiają się sporadycznie. Różnice entropii są jeszcze mniejsze, bo na ogół rzędu 10^{-3}÷10^{-2}% (tablica 2). Oznacza to, że błąd określania entalpii i entropii wynikający z pominięcia KO lub KOH na liście składników jest tego samego lub nawet niższego rzędu niż błąd spowodowany zakończeniem obliczeń numerycznych składu spalin przy założonej w niniejszej pracy ich dokładności.

Znacznie silniej oddziałuje na parametry kaloryczne pominięcie tlenku azotu. Zarówno pominięcie samego NO jak i pominięcie go wraz z KO i KOH powoduje odchylenie wartości entalpii, w stosunku do entalpii wyznaczonej dla wariantu 1 o 1÷6,5%, a entropii o 0,1÷0,44%, zależnie od temperatury i ciśnienia spalin. Wartości średnie wynoszą przy tym odpowiednio 4,5% i 0,20÷0,30%. Wyjątkiem są rezultaty uzyskane dla temperatury 2000 K. Jak wynika z tablic 1 i 2 pominięcie NO nie wpływa przy tej temperaturze w istotny sposób na entalpię. Rezultaty te należy jednak traktować bardzo ostrożnie. Z analiz przeprowadzonych przez autorów wynika bowiem, że wyznaczanie składu spalin w przedziale temperatury 2000÷2400 K jest szczególnie trudne. Powoduje to obecność licznych minimów lokalnych funkcji Gibbsa w tym obszarze. Dlatego należy się liczyć z możliwością popełnienia większego błędu przy wyznaczeniu entalpii w tym przedziale. Obliczenie entropii mimo tego odbywa się ze stosunkowo dobrą dokładnością.

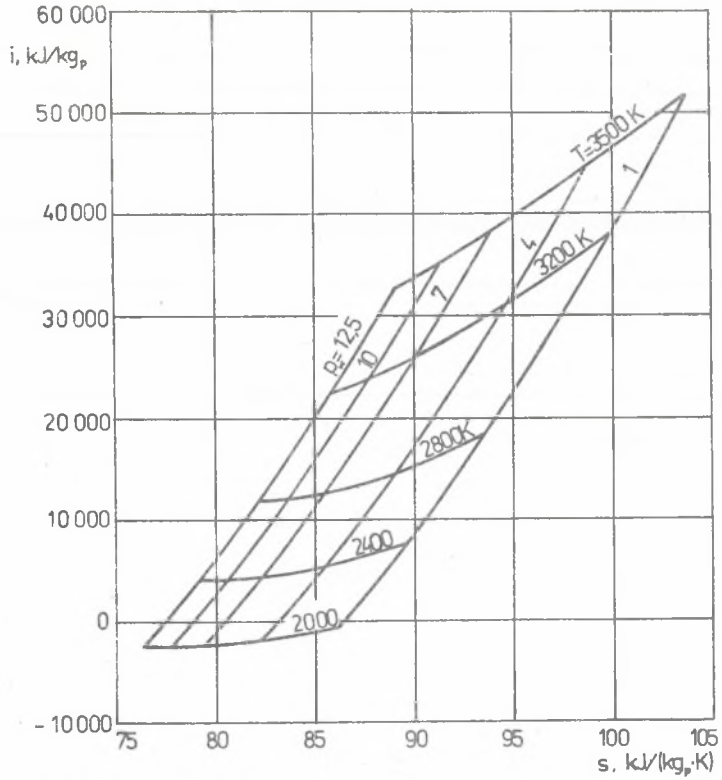
W bilansach energetycznych istotne są nie bezwzględne wartości entalpii i entropii lecz ich przyrosty wzdłuż linii charakterystycznych p = idem, T = idem oraz s = idem dla przyrostu entalpii lub i = idem dla przyrostu entropii. Przykłady takich linii pokazano na rysunkach 2 i 3.

Z tablic 1 i 2 wynika, że nieuwzględnianie w składzie spalin produktów jak w wariantach 2÷6 powoduje przesunięcie wykresu i, s otrzymanego dla wariantu 1 wzdłuż osi w zasadzie bez znacznych odkształceń.

Tym samym przyrosty parametrów mierzone wzdłuż linii charakterystycznych nie zależą w istotny sposób od wyboru wariantu listy składników spalin. Jedynie pominięcie tlenku azotu - wariant 4 lub 6 - daje większe odchyłki. Dla oceny ilościowej wykonano obliczenia porównawcze izentropowego spadku entalpii.

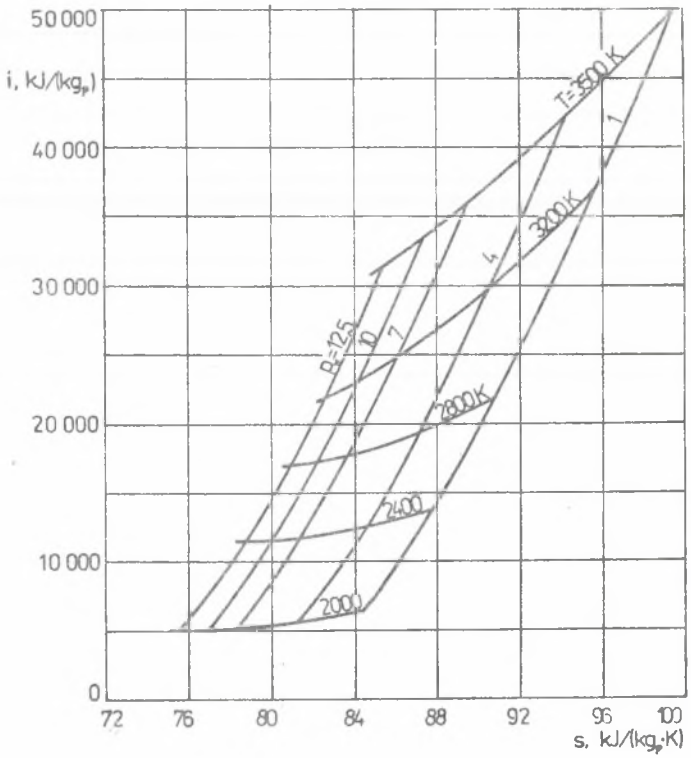
Stwierdzono, że względne różnice izentropowego spadku entalpii pomiędzy wariantem 4 (dla którego różnice entalpii są największe) a wariantem 1 nie przekraczają 2÷4%.

Wyniki zawarte w tablicach 1 i 2 ujmują dwa efekty wynikające z pominięcia pewnych substancji w spalinach. Pierwszy, o charakterze bezpośrednim, polega na występowaniu pierwiastków tworzących rozważane związki w innych składnikach o zmienionej koncentracji. Zamiast KOH i KO pojawia



Rys. 2. Przykładowy wykres i,s wysokotemperaturowych spalin; λ = 0,90

Fig. 2. Examplary diagram in i,s coordinate system for high-temperature combustion products; λ = 0,90



Rys. 3. Przykładowy wykres i,s wysokotemperaturowych spalin; λ = 0,95

Fig. 3. Examplary diagram in i,s coordinate system for high-temperature combustion products; λ = 0,95

się w większej ilości wolny potas K, zgodnie z równaniem bilansu substancji. Wolny potas ma inne parametry kaloryczne niż KOH i KO, co implikuje zmianę parametrów kalorycznych spalin. Drugi z mechanizmów jest znacznie bardziej złożony i ma charakter pośredni. Eliminowane z listy produktów związki: KOH, KO, NO są inertami dla reakcji, w których nie występuje potas i azot. Ich obecność może jednak wpływać na równowagowy skład spalin, gdyż wśród reakcji zachodzących w spalinach są zarówno reakcje ekwimolarne i nieekwimolarne. Poprzez wpływ na udziały w spalinach wszystkich uwzględnianych produktów związki KOH, KO, NO wpływają na entalpię i entropię spalin.

Jak wynika z tablic 1 i 2 oba efekty nie mają w przypadku KOH i KO praktycznie żadnego znaczenia. W przypadku NO ich obecność jest już zauważalna, aczkolwiek w technicznych rozważaniach można ją pominąć. Przeprowadzone badania prowadzą zatem do wniosku, że w zakresie temperatury 2000÷÷3500 K i ciśnienia 0,1÷1,25 MPa pominięcie wodorotlenku potasu KOH lub tlenku potasu KO nie wpływa znacząco na wartość entalpii i entropii spalin. Ze względu na wartości przyrostów parametrów kalorycznych wzdłuż krzywych charakterystycznych dopuszczalne jest ponadto pomijanie nie tylko KOH i KO lecz także NO.

LITERATURA

[1] Składzień J.: Uproszczona metoda analizy cieplnej wysokotemperaturowej komory spalania generatora MHD. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 92, Gliwice 1986.

[2] Składzień J., Wilk K.: Analiza cieplna układu wysokotemperaturowego siłowni MHD-parowej. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 92, Gliwice 1986.

[3] Energy Conversion Alternatives Study - ECAS, General Electric, Phase II, Final Report, NASA, 1976.

[4] Tsu T.C., Young W.E., Way S.: Optimization Studies of MHD Steam Plants. Electricity from MHD, Proc. of A Symposium of Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation, vol. 3, IAEA, Vienna 1966.

[5] Kirillin V.A., Sčejndlin A.E., Koriagina G.M.: Perspektivy vnedrożenija v energetiku kombinirovannych ustanovok. Fiziko-techničeskije Problemy Sozdanija MGDES, Materialy naučno-techničeskogo soveščenija stron-členov SEB SFRK. Kiev 2-8 sentjabrja 1984. Izd. Institut Vysokich Temperatur AN SSSR, Moskva 1985.

[6] Ministerstvo energetiki i elektrofikacji SSSR, Glovniinprojekt, Energetičeskij Institut im. G.M. Kriżżanovskogo: Teplofizičeskie svojstva chimičeskich reagirujuščich geterogennych smesej, Moskva 1973.

[7] Teplofizičeskie svojstva chimičeskich reagirujuščich geterogennych sistem. Sbornik trudov, Moskwa 1975.

[8] Itogi naučno-issledovatelskich i opytno-konstruktorskich rabot za 1985 god. Naučno-techničeskij otčet, Moskva 1975.

[9] Das A.K., Rohatgi V.K.: Direct Coal Combustion for MHD-Effect of Seed-Slag Interactions. The 8th International Conference on MHD Electrical Power Generation, Moskwa, Sept. 12-18 1984.

[10] Rosa R.: Magnitogidrodinamičeskie preobrazovanie energii, Izd. Mir, Moskva 1970.

[11] Kurpisz K.: Problemy obliczeniowe wyznaczania składu równowagowego roztworu gazów półdoskonałych. Archiwum Termodynamiki. Artykuł przesłany do redakcji.

Recenzent: doc. dr inż. Antoni Guzik

Wpłynęło do redakcji w marcu 1989 r.

ВЛИЯНИЕ ВЫБРАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВ СГОРАНИЯ НА ИХ ЭНТАЛЬПИЮ И ЭНТРОПИЮ

Р е з ю м е

В работе представлены результаты расчетов энтальпии и энтропии высокотемпературных ионизированных газов сгорания находящихся в состоянии химического равновесия. Учтены только газовые продукты сгорания и принято, что они ведут себя как полуидеальные газы сгорания. Исследовано влияние наличия некоторых выбранных составляющих элементов газов сгорания на рассматриваемые калорические параметры.

INFLUENCE OF SELECTED CONSTITUENTS OF HIGH-TEMPERATURE IONIZED COMBUSTION GASES ON ENTALPHY AND ENTROPY

S u m m a r y

The results of entropy and enthalpy calculations of high-temperature ionized combustion gases in chemical equilibrium have been presented. Only the gaseous combustion products have been taken into account and treated as semi-ideal gases. The influence of the presence of chosen combustion products on calorific parameters has been examined.