

Krzysztof WILK
Jan SKŁADZIEN

Kazimierz KURPISZ

WPLYW CHARAKTERYSTYCZNYCH PARAMETRÓW EKSPLOATACJI UKŁADÓW MHD NA EFEKTYWNOŚĆ CIEPLNĄ PRACY ELEKTROWNI MHD-PAROWEJ

Streszczenie. Praca zawiera termodynamiczną analizę działania elektrowni MHD-parowej. Wykorzystując opracowane uprzednio procedury oraz kody obliczeniowe dotyczące procesów przebiegających w układzie wysokotemperaturowa komora spalania – generator MHD określono sprawność ogólną rozpatrywanej elektrowni. Założono typowe wartości charakterystycznych parametrów. Jako zmienne przyjęto wstępny stosunek nadmiaru powietrza oraz zawartości posiewu w spalinach. Zbadano równoczesny wpływ obu ww. parametrów na sprawność całkowitą elektrowni MHD-parowej.

THE INFLUENCE OF THE MHD SYSTEM CHARACTERISTIC EXPLOATATION PARAMETERS ON THE THERMAL EFFICIENCY OF THE MHD-STEAM POWER PLANT OPERATION

Summary. In the paper the thermal analysis of the MHD-steam power plant operation is given. The general efficiency of the power plant being analysed was determined using numerical procedures and codes which were elaborated by the authors in the past. These procedures and codes concern processes taking place in the system: high-temperature combustion chamber, MHD-generator. The typical values of the characteristic parameters were considered. Some values of the introductory air excess ratio and contents of seeding in combustion gases were assumed. The simultaneous influence of these both parameters on the general efficiency of the MHD-steam power plant was examined.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ОБЩУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МТД – ПАРОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Резюме. В работе представлен термодинамический анализ МТД – паровой электростанции. Рассматривано влияние излишка воздуха и состав посева в выходных газах на общую эффективность установки.

WSTĘP

Elektrownie kombinowane MHD-parowe opalane węglem kamiennym stanowią jedną z perspektyw rozwoju energetyki. Charakteryzują się one [1] wysoką, sięgającą 51% sprawnością termodynamiczną, bardzo małą emisją tlenków siarki i azotu, małą ilością odpadów stałych oraz mniejszym niż klasyczne elektrownie zapotrzebowaniem na wodę. Nawet w przypadku spalania silnie zasiarczonego węgla emisja tlenków siarki do otoczenia jest znikoma dzięki wiązaniu siarki przez posiew jonizujący.

Podstawowymi parametrami mającymi wpływ na pracę instalacji MHD są: wstępny stosunek nadmiaru powietrza w wysokotemperaturowej komorze spalania, rodzaj i zawartość posiewu w spalinach, ciśnienie w komorze spalania, prędkość spalin w kanale roboczym, temperatura podgrzania powietrza. Decydują one bezpośrednio o temperaturze zjonizowanych spalin i ich przewodności elektrycznej, a w efekcie o gęstości mocy elektrycznej generowanej w kanale MHD, ilości uzyskiwanej w kanale roboczym energii elektrycznej, ilości wiązanej przez posiew siarki itd.

Praca niniejsza stanowi efekt końcowego etapu prac nad analizą wysokotemperaturowego członu elektrowni MHD-parowej. Prace te prowadzone w latach 1984–1991 mieściły się w ramach zadań własnych, programu CPBP 02.18 [2 – 10] oraz grantu KBN 3 0558 91 01. Podstawowym ich wynikiem było stworzenie oryginalnych programów numerycznych służących do wyznaczenia składu równowagowego wysokotemperaturowych roztworów gazowych [11], których składniki są gazami półdoskonałymi oraz programów modelujących przemiany termodynamiczne w części wysokotemperaturowej elektrowni MHD-parowej. Programy te wykorzystano do przeprowadzenia wielowariantowych obliczeń dotyczących wymienionych wcześniej relacji pomiędzy: wstępną wartością stosunku nadmiaru powietrza, udziałem posiewu w spalinach, prędkością i ciśnieniem w punktach charakterystycznych, a gęstością generowanej w kanale MHD mocy elektrycznej oraz teoretyczną ilością energii elektrycznej uzyskiwanej z 1 kg węgla. Zaproponowano kryterium doboru wstępnego (dla komory cyklonowej) stosunku nadmiaru powietrza i zawartości posiewu w spalinach.

Niniejszy ostatni etap poświęcony był analizie wpływu udziału posiewu oraz wstępnego stosunku nadmiaru powietrza na sprawność całkowitą elektrowni.

1. OPIS INSTALACJI MHD-PAROWEJ

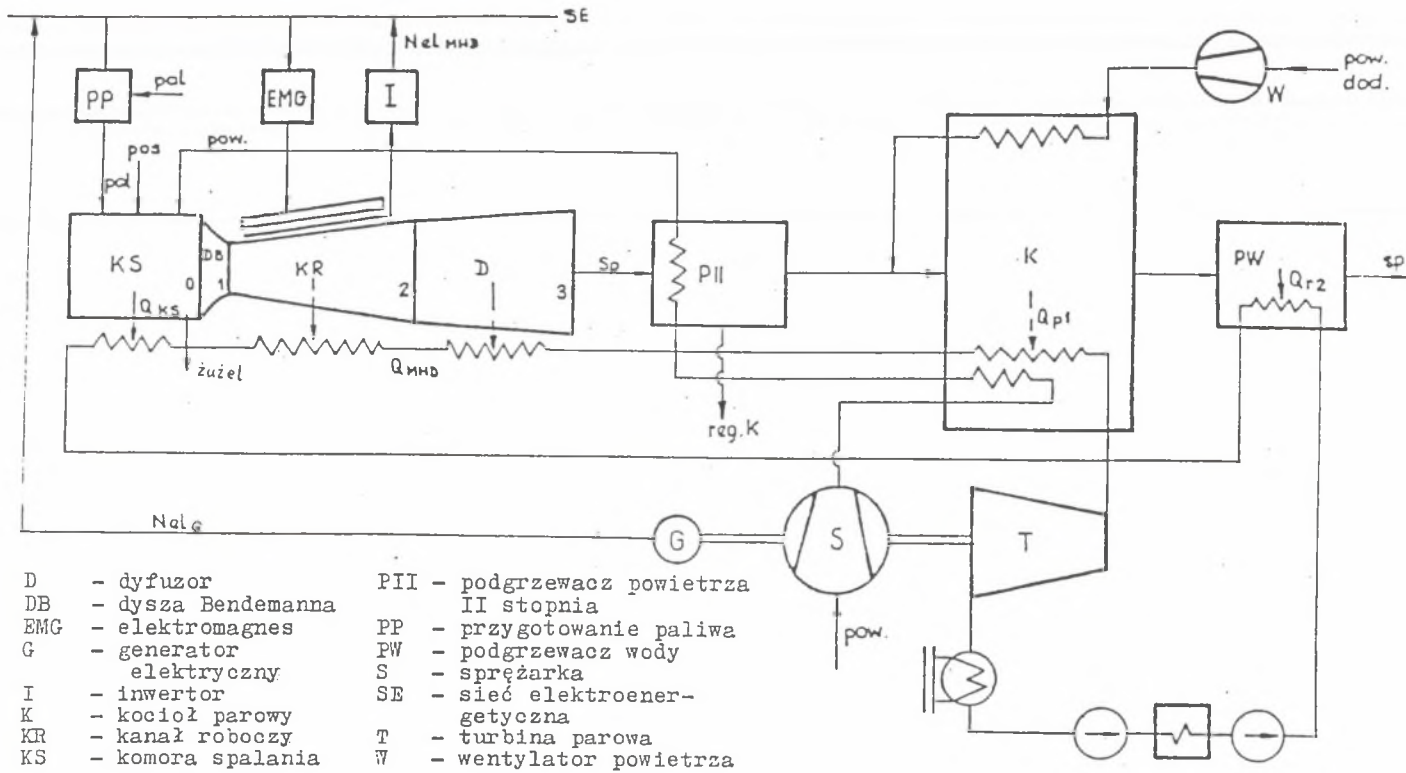
Uproszczony schemat instalacji elektrowni kombinowanej MHD-parowej pokazano na rys. 1. W schemacie tym wyróżnić można dwa człony. Człon wysokotemperaturowy obejmuje wysokotemperaturową komorę spalania (KS), dyszę rozprężającą (DB), kanał roboczy MHD (KR), dyfuzor (D) i podgrzewacze powietrza II stopnia (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. Jako utleniacz stosować można powietrze atmosferyczne [1, 12] lub powietrze wzbogacone w tlen [13]. Stosunek nadmiaru tlenu powinien wynosić około 0,9 z uwagi na maksimum temperatury spalin. Zadaniem posiewu jonizującego jest zapewnienie wymaganego stopnia jonizacji spalin w możliwej do uzyskania w instalacji przemysłowej temperaturze. 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 rozprężającej do prędkości (800–1400) m/s [1, 12, 13]. Poruszając się z tak dużą prędkością w polu magnetycznym kanału roboczego generują one prąd elektryczny. Gęstość wytwarzanej mocy elektrycznej jest wprost proporcjonalna do iloczynu kwadratu prędkości i przewodności elektrycznej spalin [14, 15]. 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, ulegają sprężeniu w dyfuzorze do ciśnienia około 0,115 MPa [1, 7].

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

Przewiduje się, że ze względów konstrukcyjnych ściany urządzeń członu wysokotemperaturowego elektrowni będą chłodzone wodą wykorzystywaną następnie w obiegu parowym. Temperatura podgrzania powietrza do spalania wynosić ma około 1800 K [1]. Wysoka temperatura podgrzania utleniacza jest konieczna ze względu na żadaną temperaturę spalin w kanale roboczym



Rys. 1. Schemat ideowy kombinowanej elektrowni MHD-parowej (D – dyfuzor, DB – dysza Bendemanna, EMG – elektromagnes, G – generator elektryczny, I – inwerter, 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)

Fig. 1. Schematic diagram of the combined MHD-steam power plant (D – diffuser, DB – Bendemann nozzle, EMG – electromagnet, G – electric generator, I – inverter, K – steam boiler, KR – working duct, KS – combustion chamber, PII – II air heater, PP – fuel preparation, PW – water heater, S – compressor, SE – power network, T – steam turbine, W – air fan)

MHD. Podgrzanie powietrza atmosferycznego do podanej temperatury jest jednym z trudniejszych problemów konstrukcyjnych. Wymaga to bowiem, przy zasilaniu wymienników 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 [16 – 18]. Ostatnie rozwiązanie jest jednak mniej korzystne, 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 jest do instalacji regenerującej. Dodatkowy walor takiego obiegu posiewu w urządzeniu stanowi 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 temperatury między spalinami a czynnikiem obiegowym, co zapewnia – jak już wspomniano – sprawność sięgającą 51% [1, 13] oraz dużą czystość spalin.

2. MODEL OBLICZENIOWY

2.1. Stan roztworu gazowego tworzącego spaliny

W warunkach termicznych panujących w generatorze MHD spaliny zawierają znaczną liczbę produktów tworzących, w przypadku zasilania urządzenia paliwem węglowym, rzeczywisty roztwór heterogeniczny. Liczba produktów uwzględnianych w analizach procesu jest różna i mieści się w przedziale od 13 do 170 [19 – 22]. W ścisłych teoretycznych rozważaniach może być uzasadnione uwzględnianie dużej liczby elementów. W obliczeniach technicznych postępowanie takie nie jest celowe. Powoduje ono wydłużenie czasu obliczeń numerycznych nie wpływając w istotny sposób na wyniki. Produkty o udziale mniejszym niż 10^{-3} praktycznie bowiem nie mają wpływu na kaloryczne parametry spalin. Ich obecność w modelu obliczeniowym jest pożądana tylko wtedy, gdy dzięki niskiemu potencjałowi jonizacji wpływają one znacząco na przewodność elektryczną spalin.

Jak już wspomniano, spaliny tworzą roztwór heterogeniczny gaz – ciecz. Na ściankach urządzenia w końcowej jego części niewykluczone jest wystąpienie również zestalonych składników. Najważniejsze ciekłe składniki pochodzą z popiołu – wg [14, 15] są to Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO . Nadto 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 [21, 22]. Łączny udział fazy ciekłej jest bardzo mały. Można się spodziewać, że w przypadku spalania węgla kamiennego o zawartości wagowej popiołu ok 7%, w cyklono-

wej komorze z ciekłym odprowadzaniem 85% zużła, nie przekroczy on ok. 0,1% masy spalin. Oznacza to, że w analizach o charakterze technicznym można pominąć obecność w instalacji fazy ciekłej. Założenie to jest tym bardziej uzasadnione, że ciekłe produkty osadzają się głównie na ściankach urządzenia. Na podstawie powyższych uwag oraz wyników badań dotyczących wpływu uwzględnianych składników spalin na ich parametry [4] przyjęto następujące ważniejsze założenia:

1. Spaliny są roztworem homogenicznym (gazowym) i nie zawierają żadnych produktów pochodzących z popiołu.
2. Wszystkie składniki spalin zachowują się jak gazy półdoskonałe.
3. Składniki spalin są ze sobą w równowadze chemicznej.
4. Spośród składników spalin istotną rolę odgrywają następujące substancje: H, O, K, O₂, OH, NO, N₂, H₂, H₂O, CO, CO₂, KOH, KO, Ar, SO₂.

Założenie, że spaliny tworzą homogeniczny roztwór w stanie równowagi chemicznej, znakomicie upraszcza problem wyznaczenia składu spalin i jest zabiegiem często spotykanym w analizie tego typu zagadnień. Jest ono uzasadnione wobec zakresu parametrów termicznych występujących w wysokotemperaturowej części elektrowni MHD–parowej. Z drugiej strony przyjęcie stanu równowagi w izotermicznym układzie heterogenicznym też nie byłoby ściśle zgodne z rzeczywistością. Ciekły żużel gromadzi się bowiem na ściankach urządzenia i ma inną temperaturę niż faza gazowa. Nie jest więc możliwe określenie równowagowego składu heterogenicznych spalin na drodze klasycznej. Trudno przy tym jednoznacznie stwierdzić, które z założeń dałoby korzystniejsze rezultaty.

Zgodnie z podanymi założeniami, entalpię i entropię spalin uzyskanych z 1 kg paliwa obliczano z zależności:

$$i = \sum_{j=1}^N n_j (Mi)_j^0, \quad (1)$$

$$s = \sum_{j=1}^N n_j (Ms)_j^0 - (MR) \sum_{j=1}^N n_j \ln \left(\frac{n_j}{n} p \right) \quad (2)$$

gdzie:

- i – entalpia spalin;
- s – entropia spalin;
- n_j – liczba kilomoli j-tego składnika spalin powstająca ze spalania 1 kg paliwa;
- n – liczba kilomoli spalin powstająca ze spalania 1 kg paliwa;
- N – liczba składników spalin;

$(Ms)_j^\circ$ – właściwa kilomolowa entropia składnika j w danej temperaturze i pod ciśnieniem normalnym p_n , uwzględniająca entropię chemiczną w warunkach standardowych oraz izobaryczny przyrost entropii;

$(Mi)_j^\circ$ – właściwa kilomolowa entalpia całkowita składnika j , uwzględniająca entalpię chemiczną w warunkach standardowych;

(MR) – uniwersalna stała gazowa;

$p = p_a/p_n$ – ciśnienie względne spalin;

p_a – ciśnienie rzeczywiste spalin.

Przyjęto poziom odniesienia związany z warunkami: $p_n = 101\,325$ Pa, $T_n = 0$ K. Entalpia właściwa $(Mi)_j^\circ$ jest równa sumie właściwej entalpii fizycznej oraz właściwej entalpii chemicznej. Za tę ostatnią przyjęto entalpię tworzenia czystego składnika j . Entalpia swobodna G może być zapisana w sposób następujący:

$$G = i - Ts = \sum_{j=1}^N n_j \left\{ (Mi)_j^\circ - T \left[(Ms)_j^\circ - (MR) \ln \left(\frac{n_j}{n} p \right) \right] \right\} \quad (3)$$

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

$$G(n_1, n_2, \dots, N_n) \rightarrow \min \quad (4)$$

przy równoczesnym spełnieniu ograniczeń wynikających z liniowych równań bilansu pierwiastków i warunków nieujemności udziałów. W rozpatrywanym przypadku pierwiastków jest siedem: C, S, H, O, N, 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 procedur wyznaczania równowagowego składu spalin przedstawiono w pracy [11].

2.2. Równania bilansu energii dla generatora MHD

Szczegółowe równania bilansu energii dla generatora MHD przedstawione zostały w [20]. Równania użyteczne, stanowiące podstawę modelu numerycznego, w odniesieniu do 1 kg paliwa, mają następującą postać:

a) bilans energii dla komory spalania:

$$i_p + i_{pos} + i_a = i_0 + i_z + q_{ot} \quad (5)$$

b) bilans energii dla dyszy rozprężającej:

$$i_0 = i_1 + m_s \frac{w_1^2}{2}, \quad (6)$$

c) bilans energii dla kanału roboczego MHD:

$$\int_{s_1}^{s_2} T ds = (i_1 - i_2) \left\{ (1 - \alpha) \left[C_s \left(\frac{1}{\eta_{el}} - \frac{1}{C_s} \right) + \beta \right] - \alpha \right\}, \quad (7)$$

$$e_{el} = (1 - \alpha) C_s (i_1 - i_2), \quad (8)$$

d) równanie gęstości mocy N_v elektrycznej generowanej w kanale roboczym o konfiguracji Faradaya [14, 15]:

$$N_v = \sigma w_2^2 B^2 \eta_{el} (1 - \eta_{el}), \quad (9)$$

gdzie:

i_p – entalpia właściwa paliwa doprowadzanego do komory spalania;

i_{pos} – entalpia wodnego roztworu posiewu;

i_z – entalpia ciekłego żużla;

i_a – entalpia powietrza;

i_0, i_1, i_2 – entalpia spalin uzyskanych z 1 kg paliwa odpowiednio w: przekroju wylotowym komory spalania, przekroju wylotowym dyszy rozprężającej, przekroju wylotowym kanału roboczego;

q_{ot} – ilość ciepła odprowadzanego przez ściany komory spalania:

$$q_{ot} = \mu (W_d + \Delta i_{fa}) - \text{gdzie}$$

W_d – wartość opałowa paliwa,

Δi_{fa} – entalpia fizyczna powietrza doprowadzanego do komory,

μ – współczynnik chłodzenia ścian komory;

m_s – masa spalin uzyskiwanych z 1 kg paliwa;

w_2 – prędkość spalin w kanale roboczym (prędkość ta jest dla rozważanego kanału stała wzdłuż całej jego długości);

e_{el} – teoretyczna ilość energii elektrycznej możliwa do uzyskania w kanale roboczym z 1 kg paliwa w danych warunkach eksploatacyjnych;

s_2, s_3 – entropia spalin wpływających i wypływających z kanału MHD;

T – temperatura spalin;

- α – współczynnik strat ciepła przez ściany kanału;
 β – współczynnik tarcia w kanale roboczym;
 C_s – współczynnik zaszlakowania elektrod;
 η_{el} – sprawność elektryczna kanału roboczego wyznaczona z zależności
 $\eta_{el} = \sigma / (k_g + \sigma)$, gdzie
 k_g – stały parametr generatora,
 σ – właściwa przewodność elektryczna zjonizowanych spalin;
 B – indukcja pola magnetycznego.

2.3. Przewodność elektryczna spalin

Prąd elektryczny generowany w kanale roboczym MHD jest wynikiem uporządkowanego ruchu nośników dodatnich i ujemnych ładunków elektrycznych, powstających wskutek termicznej jonizacji produktów spalania. Obliczanie przewodności elektrycznej zjonizowanych gazów z uwzględnieniem wszystkich obdarzonych ładunkiem drobin jest sprawą kłopotliwą. W rozważanym przypadku wśród nośników ujemnego ładunku elektrycznego występują nie tylko elektrony, lecz i aniony, i to zarówno jednowujemne np.: O_2^- , OH^- , O^- , NO_2^- , jak i takie, które powstają w wyniku jonizacji wielostopniowej. Ich udział w generowaniu prądu elektrycznego zależy od ich koncentracji. Przeprowadzona analiza stałych równowagi jonizacji oraz danych literaturowych [21] pozwoliła stwierdzić, że w badanym układzie istotny wpływ na przewodność elektryczną spalin ma jedynie jednostopniowa jonizacja potasu: $K \rightarrow K^+ + e$. W obliczeniach numerycznych przyjęto więc, że jest to jedyne źródło nośników ładunku elektrycznego. Koncentracje elektronów i kationów K wyznaczono za pomocą równania Saha, słusznego dla jonizacji jednostopniowej:

$$K = \frac{n_e n_i}{n_0} = \frac{2g_i}{g_e} \frac{(2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{eU}{kT}\right), \quad (10)$$

gdzie:

- K – stała reakcji jonizacji danego związku (pierwiastka);
 n_e – koncentracja elektronów;
 n_i – koncentracja kationów;
 n_0 – koncentracja obojętnych drobin;
 g_i, g_e – wagi statystyczne jonów i elektronów;
 h – stała Plancka;
 m_e – masa elektronu;
 e – ładunek elektronu;
 k – stała Boltzmann;
 T – temperatura spalin;
 U – potencjał jonizacji.

Uwzględniając, zgodnie z powyższymi założeniami, jedynie reakcję jedno-stopniowej jonizacji potasu otrzymuje się:

$$K = \frac{2g_i}{g_e} \frac{(2\pi m_e)^{3/2} (kT)^{5/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{eU}{kT}\right) \quad (11)$$

przy czym

$$\frac{n_e}{n_0} = \left(K \frac{z_k}{p}\right)^{1/2} \quad (12)$$

gdzie:

p – ciśnienie względne spalin;

z_k – udział molowy potasu w składzie spalin traktowanych jako obojętne elektrycznie.

Przewodność elektryczną spalin obliczano za pomocą klasycznej formuły [23]:

$$\sigma = 0,532 \frac{e^2 n_e}{(m_e kT)^{1/2} Q n_0} \quad (13)$$

w której Q wyraża zastępczy przekrój czynny obojętnej drobiny spalin na zderzenie z elektronem. Przekrój taki wyznaczano jako średnią ważoną przekrojów indywidualnych wszystkich obojętnych drobin występujących w roztworze spalin. Wagami są w takim przypadku udziały molowe drobin w spalinach.

2.4. Wyznaczanie sprawności ogólnej elektrowni MHD-parowej

Sprawność całkowitą elektrowni wyznaczono [10] z zależności:

$$\eta_{\text{całk}} = \eta_{\text{MHD}} + \eta_{\text{TP}} - \eta_{\text{MGN}} - \eta_{\text{ML}}, \quad (14)$$

gdzie:

– wydajność względna generatora

$$\eta_{\text{MHD}} = \frac{\Delta i_{\text{MHD}}}{W_d} (1 - \alpha) \eta_{\text{inw}} C_s, \quad (15)$$

– wydajność względna części parowej

$$\eta_{\text{TP}} = \left[(Q_{p1} + Q_{p2} + Q_{ks} + Q_{\text{MHD}}) \eta_{\text{par}} - \frac{l_{\text{sp}}}{\eta_m} \right] \frac{\eta_g}{W_d}, \quad (16)$$

gdzie l_{sp} – jednostkowa praca sprężania.

Zapotrzebowanie względne energii do zasilania elektromagnesu oszacowano na podstawie [24]:

$$v_{MGN} = 0,0075 . \quad (17)$$

Zapotrzebowanie względne na energię napędową młyna węglowego [24]:

$$v_{ML} = 0,0023 . \quad (18)$$

3. DANE. WYNIKI OBLICZEŃ. WNIOSKI

Przy przeprowadzaniu obliczeń liczbowych przyjęto dodatkowo następujące założenia:

1. Paliwo oraz posiew doprowadzane do komory spalania mają temperaturę $T_0 = 293 \text{ K}$.
2. Posiew doprowadzany jest w postaci wodnego roztworu węglanu potasu. Udział wagowy K_2CO_3 w roztworze jest równy 50%.
3. Ze względu na małą wartość, w porównaniu z innymi wielkościami w bilansie, pomija się entalpię tworzenia roztworu posiewu.
4. Powietrze podgrzane jest do temperatury $T_a = 1800 \text{ K}$ i ma następujący skład (udziały molowe) azot – 0,78, tlen – 0,21, argon – 0,01.
5. Entalpia żużła równa jest 2450 kJ/kg . Wartość ta odnosi się do sumarycznej ilości żużła i popiołu równej zawartości popiołu w paliwie.
6. Współczynnik chłodzenia ścian komory [8] $\mu = 0,05$.
7. Obliczenia przeprowadzono dla węgla typu 31 o wartości opałowej $W_d = 24500 \text{ kJ/kg}$, entalpii tworzenia (w temperaturze 293 K) $i_p = 1634 \text{ kJ/kg}$ i składzie (udziały wagowe): c-0,6583, h-0,0470, n+s-0,0214, o-0,1283, w-0,1000, p-0,0450.
8. Sprawność dyszy rozprężającej $\eta_D = 0,90$.
9. Obrazem przemiany zachodzącej w kanale MHD jest we współrzędnych T, s odcinek prostej.
10. Średnia wartość przewodności elektrycznej spalin w kanale jest równa średniej arytmetycznej przewodności przy dopływie i przy wypływie z kanału roboczego.
11. Współczynnik chłodzenia ścian generatora MHD $\alpha = 0,10$.
12. Stopień zaszlakowania elektrod $C_s = 0,956$.
13. Współczynnik tarcia w kanale roboczym $\beta = 0,10$.
14. Parametr charakteryzujący pracę generatora $k_g = 2,3375$ [2].
15. Ciśnienie względne w przekroju wylotowym kanału MHD $p_3 = 1$. Ciśnienie to określono jako stosunek $p_a/101325$, gdzie p_a – lokalna wartość ciśnienia w Pa.

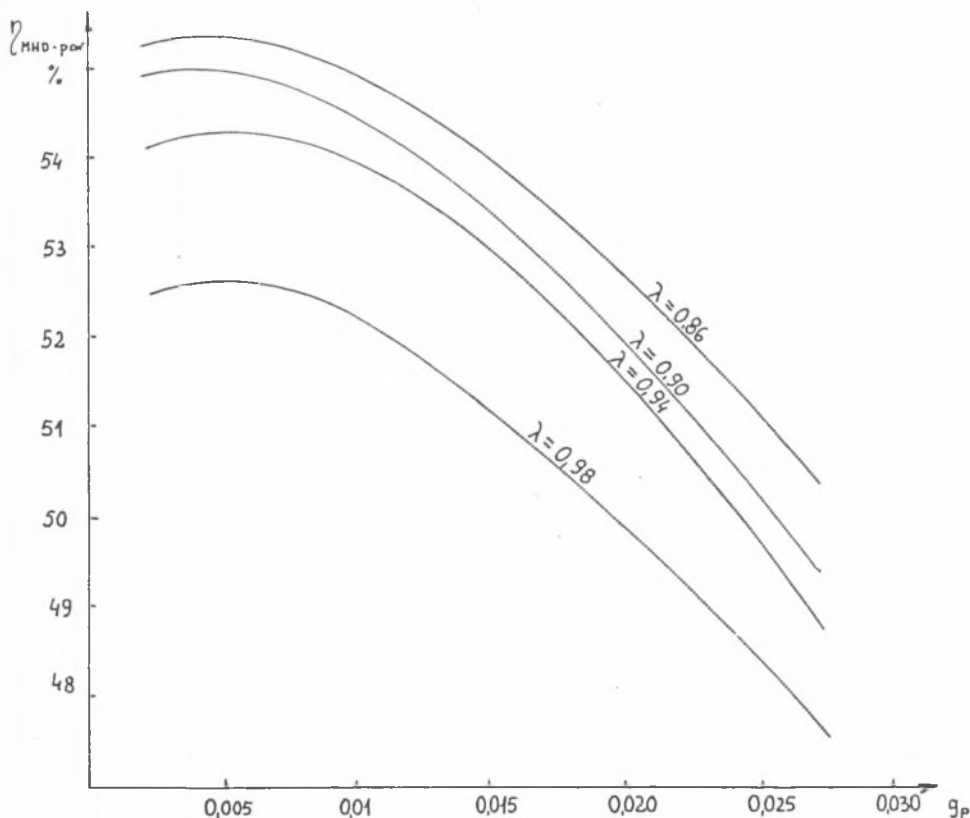
16. Temperatura powietrza doprowadzanego z kotła K do podgrzewacza PII wynosi 1100 K [1].

17. Założone wartości parametrów :

dla inwertora	$\eta_{inw} = 0,98,$
dla części parowej	$\eta_{par} = 0,41,$
dla generatora	$\eta_g = 0,98,$
dla sprężarki	$\eta_m = 0,98$ i $\eta_{is} = 0,87.$

18. Całkowity stosunek nadmiaru powietrza $\lambda = 1,05$.

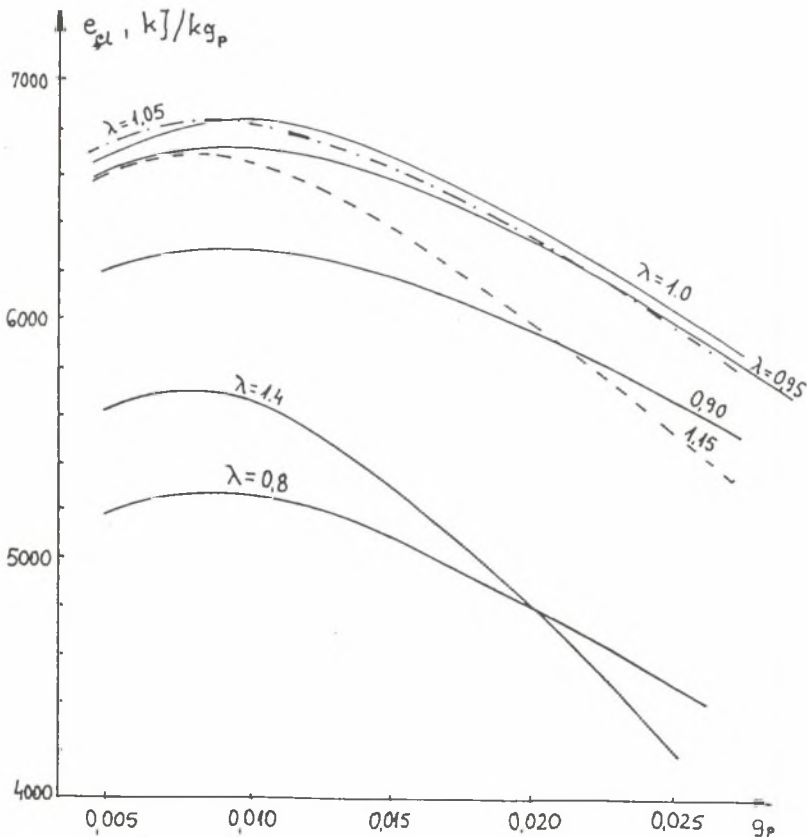
19. W popiele pozostaje 90% siarki.



Rys. 2. Sprawność całkowita elektrowni MHD–parowej w funkcji udziału posiewu w spalinach g_p oraz wstępnego stosunku nadmiaru powietrza do spalania λ

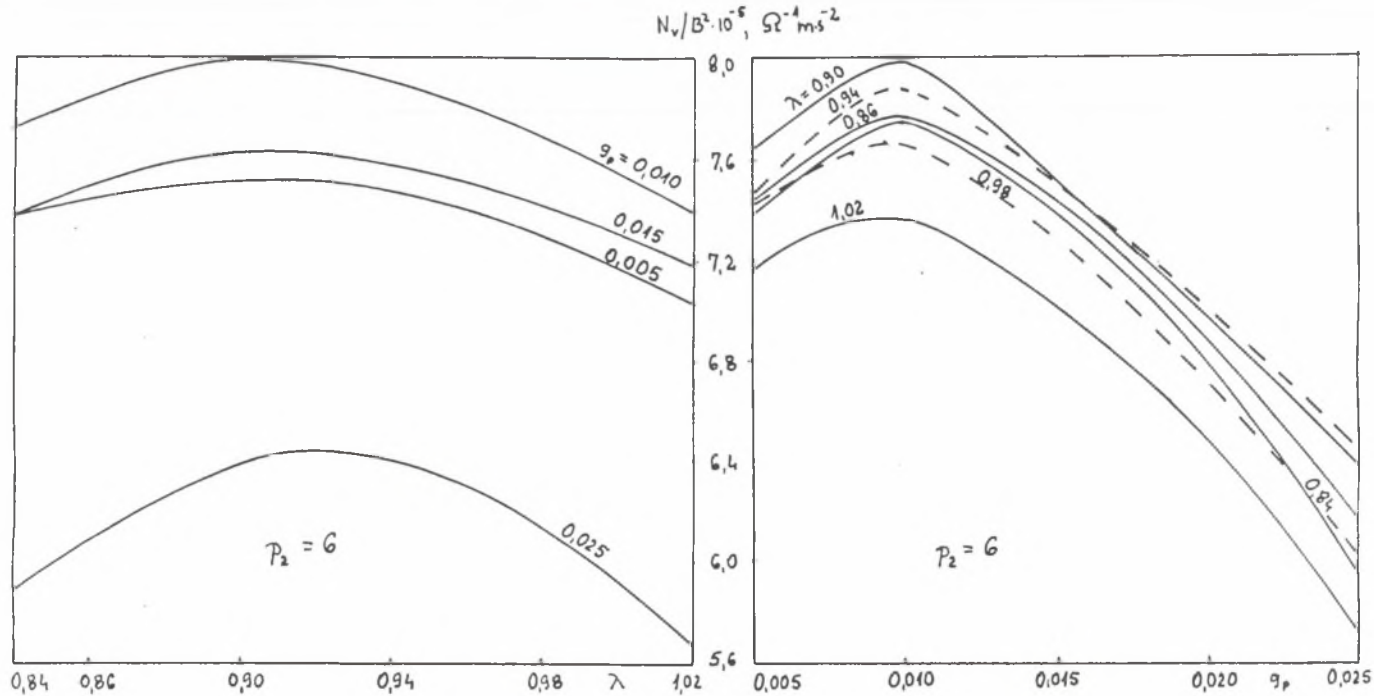
Fig. 2. General efficiency of the MHD–steam power plant as a function of contents of seeding in combustion gases g_p and the introductory combustion air excess ratio λ

Obliczenia przeprowadzono dla wstępnego stosunku nadmiaru powietrza $\lambda = 0,86 \div 0,98$ oraz udziału posiewu w spalinach $g_p = 0,005 \div 0,030$. Według wcześniejszych badań przeprowadzonych przez autorów pracy [8] w przedziałach tych mieszczą się optymalne wartości λ i g_p ze względu na maksymalną wartość gęstości mocy elektrycznej generowanej w kanale MHD oraz teoretyczną ilość energii elektrycznej wytwarzanej w części MHD. Według dostępnych danych [1] w przedziałach tych mieścić się będą wartości ww. parametrów w projektowanych elektrowniach MHD-parowych.



Rys. 3. Zależność ilości energii elektrycznej e_{el} generowanej w kanale MHD z 1 kg paliwa od wielkości parametrów g_p i λ

Fig. 3. Dependence between the electric energy amount e_{el} generated in MHD-duct from 1 kg of coal fuel and the values of g_p and λ parameters



Rys. 4. Zależność gęstości mocy elektrycznej N_v generowanej w kanale MHD od wielkości parametrów g_p i λ

Fig. 4. Dependence between the electric power density N_v generated in MHD-duct and the values of g_p and λ parameters

Wyniki obliczeń sprawności ogólnej elektrowni przedstawiono na rys. 2. Na rys. 3 przedstawiono zależność maksymalnej ilości energii elektrycznej generowanej w kanale MHD z 1 kg paliwa, którą można utożsamiać ze sprawnością energetyczną członu MHD [8], na rys. 4 zaś zależność gęstości energii elektrycznej generowanej w kanale MHD od stosunku λ oraz udziału posiewu g_p . Z przedstawionych na rysunkach wykresów wynikają następujące wnioski:

- Całkowita sprawność energetyczna elektrowni MHD-parowej zależy silnie od udziału posiewu w spalinach wykazując maksimum przy zawartości posiewu $g_p = 0,005 \div 0,010$. Przebieg krzywych na rys. 2 jest intuicyjnie oczywisty. Jak wynika z rys. 3, w tym przedziale mieści się maksimum sprawności części MHD. Znaczne zwiększenie g_p powoduje silne schłodzenie spalin, a tym samym obniżenie sprawności zarówno części MHD, jak i parowej. Zmniejszenie g_p poniżej „optymalnego” powoduje z kolei spadek sprawności części MHD.
- W badanym przedziale wartości wstępnego stosunku nadmiaru powietrza λ sprawność całkowita elektrowni maleje monotonicznie ze wzrostem λ . Wynika to z przyjęcia do obliczeń wysokich wartości sprawności części parowej ($\eta_{par} = 0,41$) oraz temperatury podgrzania powietrza w kotle równej 1100 K. Dane te, dla przyszłościowej elektrowni, zaczerpnięto z pozycji [1]. Wysoka wartość η_{par} sprawia, że wielkość v_{TP} przyjmuje większe wartości aniżeli v_{MHD} i wobec tego mniej istotny jest fakt, że zależność $v_{MHD}(\lambda)$ cechuje istnienie maksimum widocznego na rys. 3.
- Maksimum sprawności ogólnej elektrowni oraz maksimum gęstości energii elektrycznej generowanej w kanale MHD odpowiadają praktycznie takiej samej zawartości posiewu g_p .

LITERATURA

- [1] Energy Conversion Alternatives Study (ECAS), General Electric, Phase II, Final Report, NASA, 1976.
- [2] Składzień J.: Uproszczona metoda analizy cieplnej wysokotemperaturowej komory spalania generatora MHD, Zeszyty Nauk. Pol. Śl., s. Energetyka z. 92, Gliwice 1986.
- [3] Składzień J., Wilk K.: Analiza cieplna układu wysokotemperaturowego siłowni MHD-parowej, Zeszyty Nauk. Pol. Śl., s. Energetyka z. 92, Gliwice 1986.
- [4] Składzień J., Kurpisz K., Wilk K.: Wpływ składu węgla na parametry spalin w wysokotemperaturowej komorze spalania generatora MHD, Materiały II Sympozjum „Zagadnienia Energetyczne w Mechanice”, Szczyrk 1989.

- [5] Składzień J., Kurpisz K., Wilk K.: Wpływ wybranych składników wysokotemperaturowych zjonizowanych spalin na ich entalpię i entropię, *Zeszyty Naukowe Pol. Śl.*, s. Energetyka z. 108, Gliwice 1990.
- [6] Wilk K., Składzień J., Kurpisz K.: Analiza układu wysokotemperaturowego elektrowni MHD-parowej, *Mat. XIV Zjazdu Termodynamików*, Kraków 1990.
- [7] Składzień J., Wilk K., Kurpisz K.: Wpływ składu węgla na parametry spalin w wysokotemperaturowej komorze spalania generatora MHD, *Zeszyty Naukowe Pol. Śl.*, s. Energetyka z. 112, Gliwice 1991.
- [8] Wilk K., Składzień J., Kurpisz K.: Analiza układu wysokotemperaturowego elektrowni MHD-parowej, artykuł przyjęty do druku w *Archiwum Termodynamiki*.
- [9] Składzień J., Kurpisz K., Wilk K.: Analiza termodynamiczna członu wysokotemperaturowego siłowni MHD-parowej. Sprawozdania z pracy realizowanej w ramach CPBP 02.18, T.4.2.2.1, ITC Gliwice 1986-1990 (nie publikowane).
- [10] Brzozowski W., Łopuszyńska A.: Sprawność siłowni MHD-parowej dla dwóch wariantów regeneracji ciepła, *IBJ*, Warszawa 1977.
- [11] Kurpisz K.: Problemy obliczeniowe wyznaczania składu równowagowego roztworu gazów półdoskonałych. W druku.
- [12] 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.
- [13] Kirillin W.A., Scejndlin A.E., Koriagina G.M.: Perspektywy wneđrozenia w energetyku kombinowanych ustanowok. Fiziko-tiechniczeskije Problemy Sozdanija MGDES. Materiały nauczno-tiechniczeskogo sowszenija stron-czenow SEB SFRK, Kijew, 2-8.X.1984, Izd. Institut Wysokich Temperatur AN SSSR, Moskwa 1985.
- [14] Nowacki P.J.: Teoria generatora magnetohydrodynamicznego. PAN, Warszawa 1961.
- [15] Krusow U.D.: MGD-gienieratory. Izd. Nauka, Moskwa 1966.
- [16] Pudlik W., Rogowski M.: Zmiana sprawności siłowni MHD-parowej z regeneracyjnym zgazowaniem węgla spowodowana osobnym opalaniem podgrzewaczy wysokotemperaturowych. *Mat. XII Zjazdu Termodynamików*, Kraków-Rytro 1984.
- [17] Pudlik W. i in.: Experiments with Gasifications of Ground Coal by Outlet Gases from MHD Generator. Proc. of the 8th Intern. Conf. on MHD Electrical Energy Production. Moscow, 12-18 Sept. 1983, vol. 5.
- [18] Pudlik W.: The Gasification of Pulverized Coal by MHD Exhaust Gases. *Archiwum Termodynamiki*, vol. 1, 1980.
- [19] Tieplofiziczeskije swojstwa chemiczeskich reagirujuščich geterogennych smesej. Ministerstwo Energetiki i Elektrifikacji SSSR, Głowniin-

- projekt, Energeticzeskij Institut im. G.M. Krizzanovskogo, Moskwa 1973.
- [20] Tieploffiziczeskije swojstwa chemiczeskich reagirujuszczich geterogennych sistem. Sbornik trudow. Moskwa 1975.
- [21] Itogi nauczno-issledowatelskich i opytno-konstruktorskich rabot za 1985 god. Nauczno-techniczeskij otczet. Moskwa 1975.
- [22] Das A.K., Rohatgi V.H.: Direct Coal Combustion for MHD-Effect of Seed-Slag Interactions. Proc. of the 8th Intern. Conf. on MHD Electrical Power Generation, Moskva, Sept. 12-18, 1984.
- [23] Kordus A.: Plazma. Właściwości i zastosowanie w technice. WNT, Warszawa 1985.
- [24] Wilk K., Składzień J., Kurpisz K.: Analiza termodynamiczna układu wysokotemperaturowa komora spalania-generator MHD z uwagi na sprawność elektrowni MHD-parowej, Mat. XV Zjazdu Termodynamiców, Gliwice-Kokotek 1993.

Recenzent: Dr inż. Antoni Guzik

Wpłynęło do Redakcji: 16. 11. 1994 r.

Abstract

The combined power plants with magnetohydrodynamic generator (MHD-generator) and conventional steam system using hard coal may have general efficiency up to 51% [1] and simultaneously the emission of sulphur and nitrogen oxides are very small. The schematic diagram of such a MHD-stem power plant is shown in Fig. 1. In the papers [2 - 9, 24] there are presented some numerical procedures and codes elaborated by the authors as well as the results of multivariant numerical calculations. These procedures and codes are mathematically describing the thermodynamic processes which are taking place inside the high-temperature system combustion chamber - MHD generator. The combustion gases with potassium seeding are treated as a solution of semi-ideal gases and a state of chemical equilibrium is assumed. The following components of combustion gases are taken into account: H, O, K, O₂, OH, NO, N₂, H₂, H₂O, CO, CO₂, KOH, KO, Ar, SO₂ and the procedure for minimizing the free enthalpy is used. The energy balance equations for: combustion chamber, expanding nozzle and MHD-duct have a form (5) - (7), while (8) and (9) are the equations for calculating the electric energy amount generated in MHD-duct from 1 kg of hard coal fuel and the electric power density also generated in MHD-duct. The electric conductivity of ionized

combustion gases is calculated using Saha equation (10). The results obtained are given in Figs. (2) – (4). As the characteristic parameters of the processes proceeding inside the system: high-temperature combustion chamber – MHD generator the introductory air excess ratio and the contents of seeding in combustion gases were assumed. In Figs. (2) – (4) the influence of these two characteristic parameters on the general efficiency of the MHD-steam power plant, the electric energy amount generated in MHD-duct from 1 kg of hard coal fuel and the electric power density generated in MHD-duct is shown. It is well visible that all of the curves in Figs. (2) – (4) have well marked maximum.