ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1986

Seria: ENERGETYKA z. 92

Jan SKŁADZIEŃ

Instytut Techniki Cieplnej
Politechniki Śląskiej w Gliwicach

UPROSZCZONA METODA ANALIZY CIEPLNEJ WYSOKOTEMPERATUROWEJ KOMORY SPALANIA GENERATORA MHD

Streszczenie. Celem analizy cieplnej wysokotemperaturowej komory spalenia współpracującej z generatorem MHD jest określenie wartości pierwotnego stosunku nadmiaru powietrza do spalania oraz ilości doprowadzanego posiewu poprzez jego udział w spalinach. W pracy zaproponowano procedurę wstępnego określania w uproszczony sposób optymalnych wartości rozważanych parametrów, bez rozpatrywania dalszych elementów siłowni MHD-parowej. Podano również wyniki przykładowych obliczeń cyfrowych.

1. WSTĘP

Prace związane z przyszłościowym rozwojem energetyki prowadzone są w dwóch kierunkach. Z jednej strony rozwija się badania dotyczące wykorzystania niekonwencjonalnych źródeł energii, z drugiej zaś pracuje się nad modyfikacjami zwiększającymi sprawność netto siłowni konwencjonalnych, przy równoczesnym zminimalizowaniu strat środowiska. W pewnych przypadkach oba te kierunki są ze sobą związane. Sytuacja taka występuje w jednym z bardziej obiecujących wariantów przyszłościowych, a mianowicie w przypadku siłowni kombinowanych MHD-parowych [2], [4]. Siłownie te zawierają niekonwencjonalny element, jakim jest generator MHD. Równocześnie w siłowniach MHD-parowych występuje klasyczny człon z obiegiem Clausiusa-Rankine'a, siłownie zaś zasilane są paliwem organicznym. Przewiduje się, że paliwem tym będzie docelowo węgiel kamienny. Siłownie takie mogą mieć sprawność całkowitą o połowę większą od siłowni konwencjonalnych z układem do odsiarczania spalin, tzn. ok. 50%. Równocześnie siłownie MHD-parowe charakteryzują się niewielką emisją tlenków siarki i tlenków azotu, małą ilością odpadów stałych oraz mniejszym zapotrzebowaniem na wodę [2]. Emisja tlenków siarki do otoczenia jest znikoma w wyniku wiązania siarki przez posiew, nawet w przypadku spalania węgli silnie zasiarczonych. Wymienione względy sprawiają, że siłownie MHD-parowe są w polskich warunkach atrakcyjne.

Uruchomienie kompletnego bloku MHD-parowego będzie możliwe dopiero po pomyślnym przeprowadzeniu wielu badań eksperymentalnych. Należą do nich badania doświadczalne związane ze spalaniem węgla w komorze wysokotempe-

raturowej, które prowadzone były między innymi w IBJ [1]. Badania takie powinny być uzupełnione rozważaniami o charakterze teoretycznym, mającymi wskazać parametry pracy elementów siłowni MHD-parowej. W przypadku komory spalania istotny jest problem dobierania stosunku nadmiaru powietrza do spalania oraz stosunku ilości posiewu do ilości spalin.

W niniejszej pracy oparto się na przykładowych wynikach obliczeń zawartych w opracowaniach [5], [6], stanowiących kontynuację opracowania [3].

2. PRZYJĘTE KRYTERIA CZĄSTKOWE

Parametry pracy siłowni MHD-parowej, podobnie jak i w innych przypadkach, powinny być dobierane łącznie na drodze optymalizacji wieloparametrowej, przy czym jako kryterium należałoby w warunkach polskich stosować maksimum efektu ekonomicznego. Taki sposób postępowania jest ze zrozumiałych względów nierealny. Takiego sposobu postępowania nie stosuje się nawet w przypadku projektowania układów typowych, np. klasycznej siłowni parowej. Wiele parametrów określanych jest na podstawie innych kryteriów niż kryterium ekonomiczne. Kryteria te są tym prawidłowiej określone, im w większym stopniu są zgodne z podstawowym kryterium ekonomicznym. Im większa istnieje zgodność pomiędzy kryterium cząstkowym a podstawowym, tym dokładniej można określić optymalną wartość, z punktu widzenia kryterium podstawowego, parametru dobieranego w oparciu o kryterium cząstkowe. Przykładem takiego sposobu postępowania jest dobieranie stosunku nadmiaru powietrza w palenisku kotła stanowiącego element bloku energetycznego. Stosunek ten powinien być optymalizowany łącznie z wszystkimi innymi parametrami mającymi wpływ na efekt ekonomiczny. Taki sposób postępowania nie jest wskazany. W praktyce stosunek nadmiaru powietrza dobierany jest tak, aby całkowita strata wylotowa była minimalna. Ten sposób postępowania nie jest całkiem ścisły, bowiem stosunek nadmiaru powietrza związany jest z wielkością wentylatora dmuchu i jego mocą napędową oraz z nakładami na sieć przewodów powietrznych. Wartość tego stosunku wpływa ponadto na wartość strat w środowisku. W praktyce decydujący jest wpływ stosunku nadmiaru powietrza na stratę wylotową, co uzasadnia przyjęty powszechnie sposób postępowania przy określaniu optymalnego stosunku nadmiaru powietrza do spalania w kotłach energetycznych.

Jako przykład optymalizacji cząstkowej opartej na kryterium cząstkowym podano dobór stosunku nadmiaru powietrza, gdyż określenie optymalnej wartości tego stosunku jest dość istotne przy prognozowaniu parametrów pracy wysokotemperaturowej komory spalania zasilającej kanał generatora MHD. Kryterium cząstkowe przy optymalizowaniu wstępnego stosunku nadmiaru powietrza ma tu jednak zupełnie inną postać, co wynika ze specyfiki pracy generatora MHD.

Przedmiotem analizy w pracy jest pierwszy element niekonwencjonalnej części bloku siłowni MHD-parowej. Część ta składa się głównie z wysoko-

temperaturowej komory spalania, dyszy rozprężającej, kanału roboczego MHD oraz dyfuzora. Spaliny opuszczające dyfuzor poprzez wysokotemperaturowe podgrzewacze powietrza kierowane są do wymienników ciepła pełniących funkcje zbliżone do roli kotła w bloku konwencjonalnym. W pewnych przypadkach parownik może się znajdować między dyfuzorem i wysokotemperaturowym podgrzewaczem powietrza. W instalacjach pilotowych przewiduje się możliwość zastosowania podgrzewaczy powietrza opalanych autonomicznie. W jednym z wymienników zasilanych spalinami następuje ich dopalenie za pomocą strumienia powietrza wtórnego doprowadzanego w takiej ilości, aby końcowy stosunek nadmiaru powietrza był odpowiednio większy od 1.

Przedstawiony schemat jest bardzo uproszczony i zgodny ze schematem siłowni MHD-parowej opracowanym przez firmę General Electric [2]. Schemat ten jest szczególnie interesujący w polskich warunkach ze względu na rodzaj spalanego paliwa, którym jest węgiel kamienny o stosunkowo dużej zawartości siarki. Siarka ta byłaby wiązana przez posiew. Schemat z wysokotemperaturowymi podgrzewaczami powietrza włączonymi szeregowo jest z punktu widzenia termodynamicznego korzystniejszy od schematu z podgrzewaczami powietrza opalanymi autonomicznie. W tym drugim przypadku występują bowiem większe straty egzergii.

Celem analizy jest określenie optymalnych wartości wstępnego stosunku nadmiaru powietrza oraz udziału posiewu jonizacyjnego w spalinach. Jako kryterium cząstkowe należałoby brać pod uwagę średnią wartość w kanale MHD iloczynu przewodności elektrycznej spalin i kwadratu ich prędkości. Wynika to stąd, że moc elektryczna otrzymywana z jednostki objętości kanału roboczego MHD jest proporcjonalna do tego właśnie iloczynu. W dokładniejszych rozważaniach, odnoszących się do kanału o stałej prędkości spalin, należałoby równocześnie optymalizować prędkość w kanale roboczym. Kryterium maksymalnej mocy jednostkowej kanału roboczego jest dość oczywiste. Zwiększenie tej mocy powoduje bowiem nie tylko spadek kosztów kanału roboczego, ale równocześnie zmniejszenie strat w tym kanale.

W przypadku rozważań wstępnych, dotyczących wyłącznie wysokotemperaturowej komory spalania, celowe jest dokonanie dalszego uproszczenia przez przyjęcie odrębnych kryteriów cząstkowych przy optymalizacji wstępnego stosunku nadmiaru powietrza i zawartości posiewu w spalinach. Wstępny stosunek nadmiaru powietrza optymalizuje się ze względu na maksymalną spoczynkową temperaturę spalin za komorą, zawartość posiewu zaś z uwagi na maksymalną przewodność elektryczną zjonizowanych spalin za komorą wysokotemperaturową. Tak przyjęte kryteria cząstkowe wydają się być zgodne z kryterium maksymalnej wartości iloczynu przewodności i kwadratu prędkości spalin, a tym samym minimalnej objętości kanału roboczego generatora MHD.

Przyjęty sposób postępowania upraszcza tok obliczeń, który i tak jest bardzo kłopotliwy z powodu konieczności wykorzystywania wykresów i, s dla zjonizowanych spalin. Wykresy takie obowiązują dla paliwa o ściśle określonym składzie, spalanego przy określonym stosunku nadmiaru powie-

trza i dodatku posiewu. W przypadku powietrza wzbogaconego tlenem wykres taki słuszny jest również tylko dla ściśle określonego udziału tlenu w powietrzu.

3. WYKRES i, s DLA ZJONIZOWANYCH SPALIN

Analizę termodynamiczną komory spalania, podobnie jak i kanału generatora MHD, wygodnie jest przeprowadzać w oparciu o wykres entalpia właściwa, entropia właściwa dla zjonizowanych spalin.

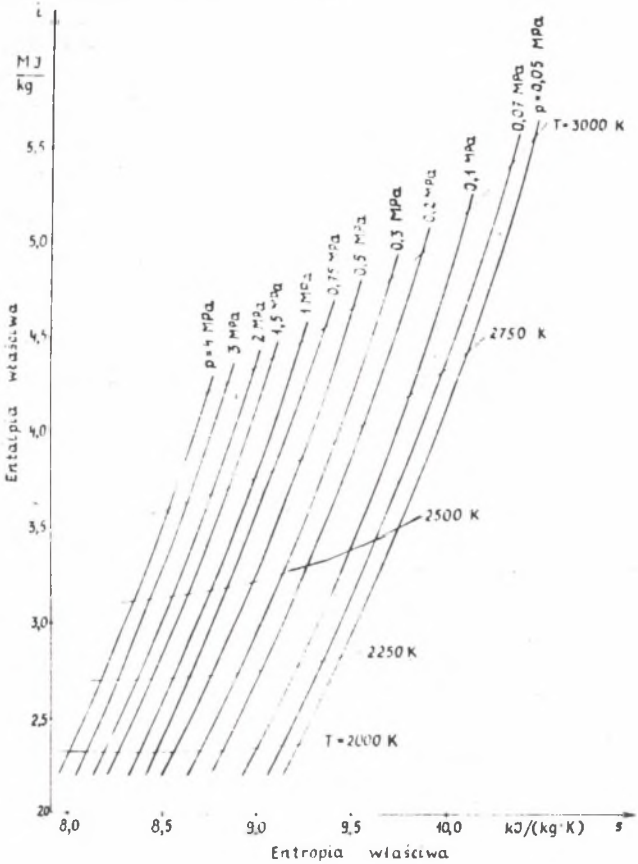
Entalpia właściwa spalin jest sumą entalpii fizycznej i chemicznej. Tę drugą składową można wyrażać za pomocą entalpii tworzenia lub entalpii dewaluacji. W obu przypadkach otrzymuje się różne wartości entalpii właściwej dla określonego stanu, nie ulega jednak zmianie wielkość podziałki na osi entalpii, czyli różnica pomiędzy entalpiami właściwymi. Przy określaniu entropii właściwej należy posługiwać się entropiami bezwzględnymi.

Przy sporządzaniu wykresów i, s konieczne jest przyjęcie pewnych założeń. Dla istniejących obecnie danych literaturowych celowe są następujące uproszczenia:

- spaliny zachowują się jak roztwór gazów półdoskonałych,
- składniki spalin znajdują się w stanie równowagi chemicznej,
- wpływ substancji w fazach skondensowanych, znajdujących się w spalinach, jest pomijalny,
- jonizacja nie wpływa na parametry właściwe spalin.

W czasie wykonywania przykładowych obliczeń liczbowych przyjęto ponadto, że w skład spalin oprócz produktów spalania zupełnego i produktów rozpadu posiewu, dostarczanego w postaci wodnego roztworu węglanu potasu, wchodzi tlenek azotu oraz pięć produktów dysocjacji spalin, a mianowicie CO, H_2, OH H i O. Pominięcie innych substancji występujących w zjonizowanych spalinach wynika z ich znikomego wpływu na przebieg procesów w komorze i w kanale generatora MHD.

Przykład wykresu i, s dla zjonizowanych spalin przedstawiono na rysunku 1, na którym wielkości właściwe odniesiono do 1 kg spalin będących przedmiotem analizy. Dla każdego kompletu analizowanych parametrów sporządzono oddzielny wykres entalpia właściwa, entropia właściwa. Charakterystyczną cechą izoterm na takich wykresach jest ich wyraźne wyginanie się ku górze przy malejącym ciśnieniu, widoczne zwłaszcza dla wyższych wartości temperatury. Wynika to stąd, że obniżenie ciśnienia powoduje zwiększenie stopnia dysocjacji, to zaś implikuje wzrost udziału w spalinach substancji o większej entalpii chemicznej. Entalpię tę w omawianym przykładzie wyrażano za pomocą entalpii dewaluacji. Rozpatrywano spalanie wzbogaconego węgla o typowym składzie i o wartości opałowej wynoszącej ok. 28 MJ/kg. Sporządzenie kolejnych wykresów i, s dla wysokotemperaturowych spalin polega na wyznaczeniu najpierw składu równowagowego przy za-



Rys. 1. Przykład wykresu i, s dla zjonizowanych spalin otrzymanych po spalaniu węgla w powietrzu atmosferycznym przy stosunku nadmiaru powietrza 0,95 i przy udziale gramowym posiewu 1%

Fig. 1. An example of i, s graph for ionized combustion gases after coal combustion in the air with excess air ratio 0.95 and mass fraction of seeding 1%

danym stosunku nadmiaru powietrza i udziale posiewu dla określonego ciśnienia i temperatury oraz na obliczeniu następnie entalpii i entropii właściwej. Otrzymuje się w ten sposób siec punktów we współrzędnych i, s.

4. OPTYMALNA WARTOŚĆ STOSUNKU NADMIARU POWIETRZA

Opracowanie kompletu wykresów i, s dla wysokotemperaturowych spalin umożliwia przeprowadzenie analizy cieplnej komory spalania oraz wstępnej optymalizacji wybranych parametrów, a zwłaszcza stosunku nadmiaru powietrza. W tym celu należy sporządzić bilans energii dla komory. W bilansie

takim oprócz całkowitej entalpii substratów w postaci paliwa, powietrza i wodnego roztworu węglanu potasu oraz produktów w postaci zdysocjowanych spalin i ciekłego żużla uwzględniono również strumień ciepła przekazywany ścianom komory. Strumień ten z punktu widzenia całej siłowni MHD-parowej nie jest równoznaczny stracie energii, gdyż ściany komory mają być chłodzone wodą obiegu turbinowego. Z punktu widzenia jednak procesu spalania wygodnie jest uważać za straty cały strumień ciepła wnikający do ścian komory. Straty te ujmowano w obliczeniach za pośrednictwem parametru bezwymiarowego, którym jest stosunek strumienia ciepła dopływającego do ścian komory i sumy entalpii fizycznej strumienia powietrza oraz energii strumienia paliwa. Za energię tę, w odniesieniu do 1 kg paliwa, uznano wartość opałową. Taki sposób postępowania wydaje się uzasadniony, chociaż entalpia właściwa paliwa jest różna od wartości opałowej, nawet jeśli korzysta się z entalpii dewaluacji.

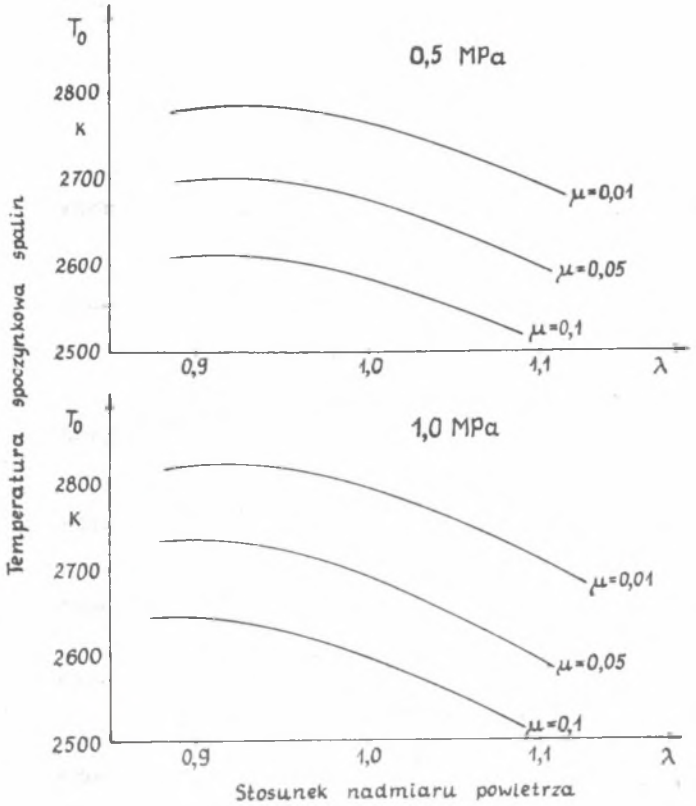
Po przeprowadzeniu obliczeń mających na celu określenie optymalnej wartości wstępnego stosunku nadmiaru powietrza otrzymano serię wykresów podających zależność temperatury spoczynkowej spalin przy wypływie z komory od rozpatrywanego stosunku. Jeden z wykresów przedstawiono na rys. 2. Z rysunku tego oraz z pozostałych wykresów wynika, że optymalna ze względu na temperaturę spalin wartość stosunku nadmiaru powietrza zawarta jest na ogół w przedziale 0,9 ÷ 0,95. W przedziale tym równocześnie temperatura spalin zależy od stosunku nadmiaru powietrza w znikomym stopniu.

Optymalny, z uwagi na temperaturę spalin za komorą, stosunek nadmiaru powietrza jest mniejszy od 1 i dlatego w urządzeniach przemysłowych przewiduje się dopalanie spalin w jednym z wymienników ciepła za kanałem generatora MHD.

5. OPTYMALNA ZAWARTOŚĆ POSIEWU W SPALINACH

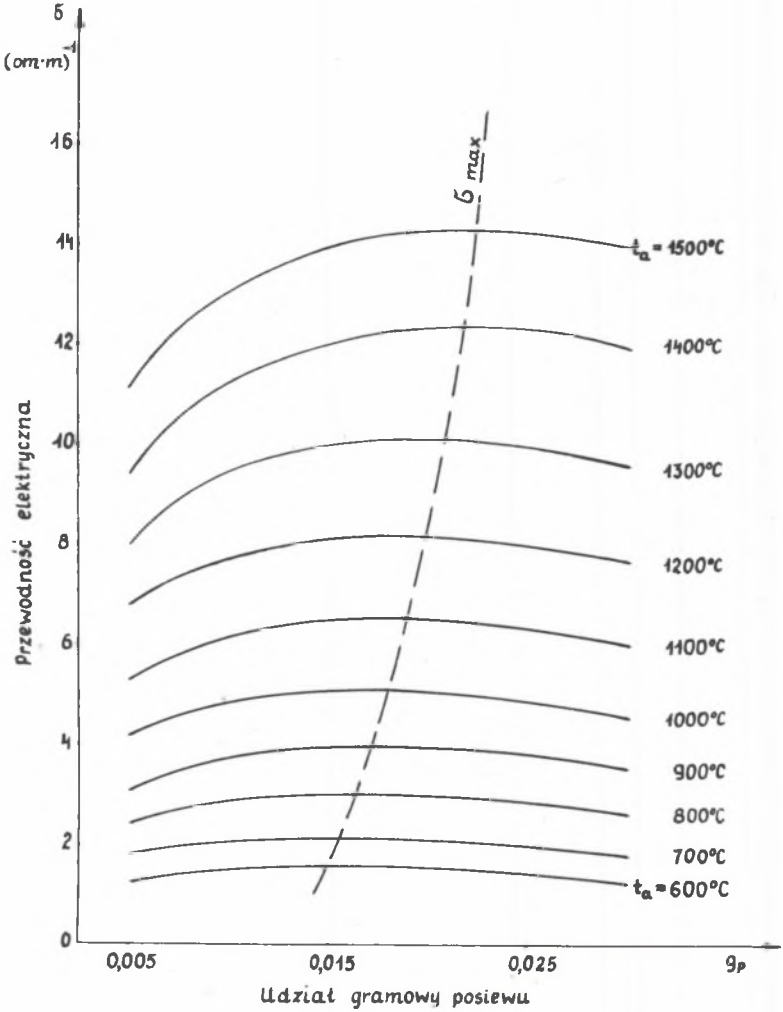
Określenie optymalnej zawartości posiewu w spalinach na drodze obliczeniowej, bez względu na przyjęte kryterium, prowadzi jedynie do orientacyjnych rezultatów. Wynika to między innymi z niezbyt dużej dokładności wzorów służących do wyznaczania przewodności elektrycznej zjonizowanych spalin.

Jak już wspomniano, w rozważaniach wstępnych proponuje się przyjęcie jako kryterium maksymalnej przewodności elektrycznej spalin za komorą wysokotemperaturową. Klasyczne fizyczne kryterium, zgodnie z którym stosunek liczby cząstek potasu do liczby cząstek pozostałych składników spalin powinien być odwrotnie proporcjonalny do stosunku odpowiednich przekrojów czynnych na zderzenie obojętnej cząstki z elektronem, nie ma uzasadnienia. Kryterium to nie uwzględnia bowiem procesów energetycznych zachodzących w komorze spalania. Posiew doprowadzany do komory przechodzi w stan gazowy oraz ulega dysocjacji, powodując obniżenie temperatury spalin. Wynika



Rys. 2. Zależność temperatury spoczynkowej spalin od stosunku nadmiaru powietrza atmosferycznego podgrzanego do temperatury t = 1200°C przy udziale gramowym posiewu 1% (μ - bezwymiarowy parametr opisujący straty ciepła w komorze)

Fig. 2. Rest temperature of combustion gases as a function of air excess ratio for atmospheric air heated to 1200°C with mass fraction of seeding 1%



Rys. 3. Zależność przewodności elektrycznej zjonizowanych spalin od udziału gramowego posiewu po spaleniu węgla w powietrzu atmosferycznym przy stosunku nadmiaru 0,9 pod ciśnieniem 0,3 MPa i gdy $\mu = 0,1$

Fig. 3. Electrical conductancy of ionized combustion gases as a function of mass fraction of seeding after coal combustion in atmospheric air with air excess ratio 0.9, pressure 0.3 MPa and $\mu = 0.1$

stąd taki przebieg krzywych jak na rysunku 3, stanowiącym również przykład wybrany z serii składającej się z wielu wykresów. Rysunek 3 przedstawia przykładową zależność przewodności elektrycznej spalin od zawartości posiewu. Otrzymane wykresy tego typu jak na rys. 3 wykazują, zgodnie z przewidywaniami, że optymalna zawartość posiewu ze względu na przewodność spalin, otrzymana po dokonaniu bilansów energii dla komory, jest kilkakrotnie niższa od wynikającej z kryterium fizycznego. Bilanse energii były tu potrzebne do określenia temperatury spalin w zależności od ilości doprowadzanego posiewu.

6. UWAGI KOŃCOWE

W pracy przedstawiono sposób postępowania umożliwiający dokonanie analizy cieplnej wysokotemperaturowej komory spalania współpracującej z generatorem MHD. Analiza taka umożliwia wstępną optymalizację niektórych parametrów spalania w oparciu o wykresy i, s dla zjonizowanych spalin i przy wykorzystaniu bilansów energii dla komory. Przedstawiony proces optymalizacyjny składa się z dwóch odrębnych części. Optymalizowanie wstępnego stosunku nadmiaru powietrza i zawartości posiewu w sposób wzajemnie niezależny jest możliwe, ponieważ parametry te w znikomym stopniu wpływają nawzajem na położenie maksimów odpowiednich krzywych.

Wyznaczone w przedstawiony sposób optymalne wartości wstępnego stosunku nadmiaru powietrza do spalania oraz zawartości posiewu jonizacyjnego powinny zostać skorygowane przez rozpatrzenie dyszy rozprężającej, kanału roboczego MHD oraz dyfuzora, zgodnie z uwagami podanymi w p. 2. Nie należy się jednak spodziewać dużych różnic w wynikach. Pozostaje natomiast do rozważenia kwestia, na ile otrzymane rezultaty są słuszne z uwagi na maksimum efektu ekonomicznego. W tym celu należy przeanalizować wpływ rozpatrywanych parametrów na ten efekt. Zwiększenie wstępnego stosunku nadmiaru powietrza powoduje między innymi konieczność zastosowania większych sprężarek o większej mocy napędowej, z drugiej jednak strony zwiększa się strumień spalin, a tym samym moc elektryczna kanału roboczego MHD. Dość trudno jest oszacować, w jakim stopniu oddziaływania te nawzajem kompensują się, należy jednakże przypuszczać, że ich wypadkowy wpływ na efekt ekonomiczny nie jest znaczny. Wydaje się zatem, że optymalna ze względu na kryterium cząstkowe wartość wstępnego stosunku nadmiaru powietrza jest bliska wartości optymalnej, biorąc pod uwagę całkowity efekt ekonomiczny. Nieco inaczej wygląda sprawa z zawartością posiewu. Zwiększenie jego strumienia jest związane z większymi stratami związków potasu do otoczenia (idealnie oczyścić spalin się nie da), z silniejszym negatywnym oddziaływaniem związków potasu na materiały ścian kanałów i wymienników ciepła, przede wszystkim zaś z większą instalacją do odzyskiwania i regeneracji posiewu. Fakty te sprawiają, że optymalną z uwagi na kryterium cząstkowe

zawartość posiewu należy traktować raczej jako wartość graniczną. Optymalna, ze względu na minimum kosztu 1 kWh energii elektrycznej, zawartość posiewu w spalinach powinna być od tej wartości granicznej niższa.

LITERATURA

[1] Brzozowski W. i inni: Opracowania Instytutu Badań Jądrowych w Świerku wykonane w ramach Programu Rządowego PR-1, 1976-77.

[2] Energy Conversion Alternatives Study (ECAS), General Electric, Phase II, Final Raport, NASA, 1976.

[3] Składzień J.: Analiza termodynamiczna komory spalania w generatorze MPD na paliwo gazowe. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., s. Energetyka z. 38, Gliwice 1971.

[4] Szargut J., Składzień J.: Siłownie kombinowane MHD-parowe - stan badań i perspektywy zastosowania w Polsce. Opracowanie ITC Pol. Śl., Gliwice 1978.

[5] Blacha K., Leśko J., Rabsztyn K., Rusek Z., Wantuła J.: Magisterskie prace dyplomowe zrealizowane w ITC Pol. Śl., Gliwice 1978-1982.

[6] Składzień J.: Analiza cieplna wysokotemperaturowej komory spalania generatora MHD. Materiały XII Zjazdu Termodynamików, Kraków - Rytro 1984.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Władysław Gajewski

Wpłynęło do redakcji w marcu 1985 r.

УПРОЩЁННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ТЕПЛОВОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГЕНЕРАТОРА МХД

Р е з ю м е

Целью теплового анализа высокотемпературной камеры сгорания содействующей с генератором МХД, является определение первичного значения отношения излишек воздуха к сжиганию а также величины приведённого посева в выхлопных газах.

В работе предложена процедура начального определения упрощённым способом оптимальных значений рассматриваемых параметров, без учёта дальнейших элементов паровой силовой установки МХД. Приведены результаты примерных цифровых расчётов.

A SIMPLIFIED METHOD OF THERMAL ANALYSIS OF HIGH-TEMPERATURE COMBUSTION CHAMBER MHD-GENERATOR

S u m m a r y

Determination of primary air excess ratio as well as a ionization addition share are the purposes of high-temperature MHD-generator combustion chamber thermal analysis. In the paper a simplified procedure for determining the most suitable values of these two parameters is proposed. This procedure does not require to analyse the other elements of the MHD-steam power plant. Some results of the example calculations are also shown.