

JANUSZ SZRENIAWSKI, ANDRZEJ JOPKIEWICZ

Politechnika Łódzka

ANALIZA NIEKTÓRYCH PROCESÓW
ZACHODZĄCYCH W INSTALACJI ŻELIWIAKOWEJ Z REKUPERATOREM
OPROMIENIOWANYM
Z PUNKTU WIDZENIA MOŻLIWOŚCI ICH AUTOMATYCZNEGO
STEROWANIA

Streszczenie. Dla wyodrębnionych w instalacji żeliwiakowej z rekuperatorem opromieniowanym procesów wymiany ciepła w rekuperatorze i dopalania gazów w komorze spalania, wyznaczono zależności pomiędzy podstawowymi wielkościami wejściowymi i wyjściowymi poszczególnych strumieni materiałowo-energetycznych. Zależności te przedstawiono w formie statycznych charakterystyk procesów.

W oparciu o te charakterystyki przeprowadzono analizę możliwości sterowania automatycznego tych procesów z uwzględnieniem ich powiązania z procesem żeliwiakowym.

Wyjaśniono przyczyny niepowodzeń prób sterowania procesu spalania gazów żeliwiakowych przy pomocy zmian ilości powietrza do ich dopalania oraz przedstawiono nowe możliwości sterowania tego procesu.

I. Wprowadzenie

W kompleksie urządzeń, który stanowi współczesna instalacja żeliwiakowa można wyróżnić szereg procesów fizykochemicznych zachodzących w samym żeliwiaku jak również w urządzeniach powiązanych z nim strumieniami materiałowo-energetycznymi, jak na przykład rekuperatorze, komorze dopalania gazów, odpylaczach itd. Zautomatyzowanie sterowania takiego zespołu procesów jest przykładem automatyzacji kompleksowej. Rozwiązanie zagadnienia tego typu wymaga szczegółowego przeanalizowania wzajemnych powiązań składowych procesów oraz możliwych systemów ich sterowania. Zwykle im bardziej złożona jest instalacja, tym trudniejsze i bardziej złożone jest jej sterowanie. Dlatego już w trakcie projektowania instalacji, której procesy mają być sterowane automatycznie należy przewidzieć sposoby realizacji tego sterowania.

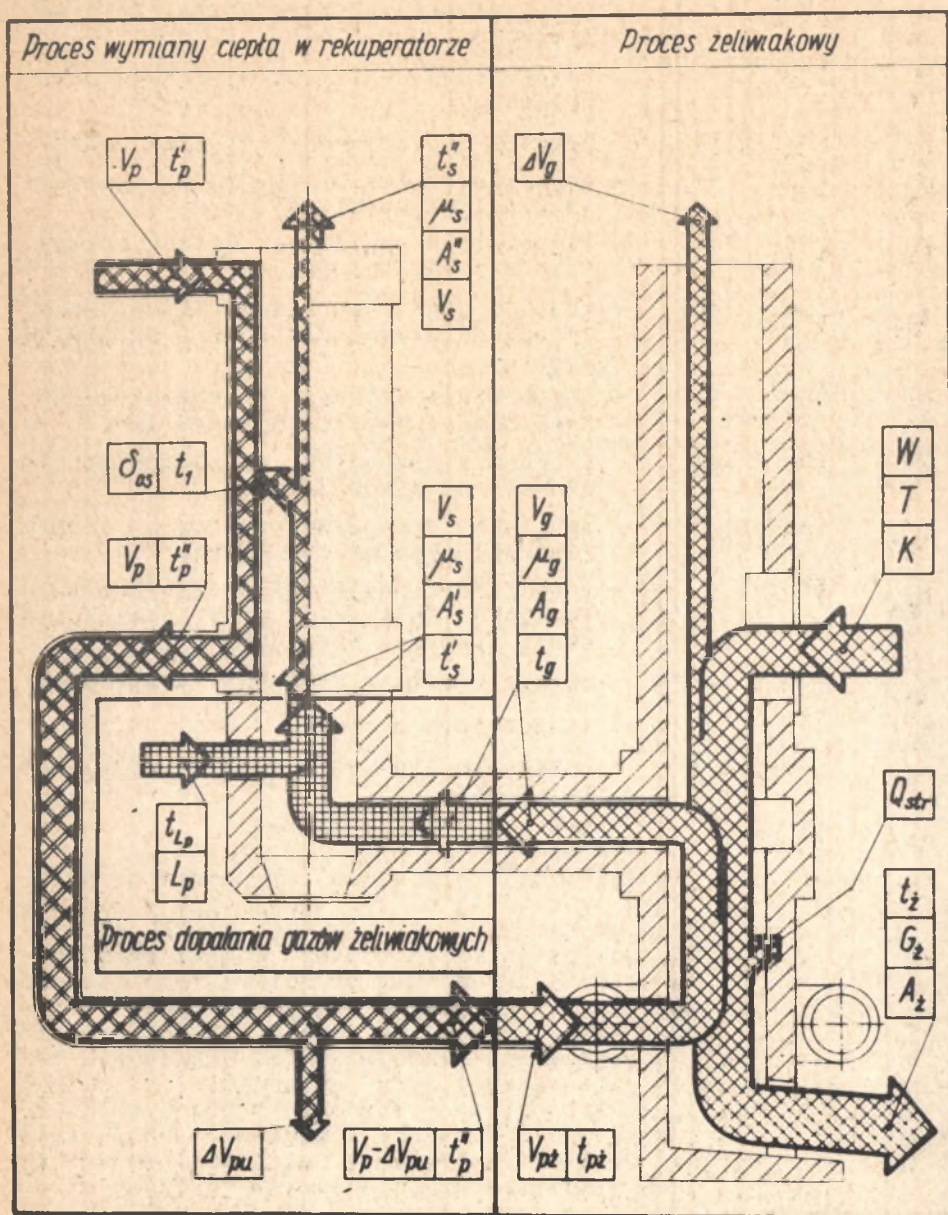
Przedstawiona w niniejszej pracy analiza automatycznego sterowania rekuperatora opromieniowanego, jako części instalacji żeliwiakowej, stanowi przykład wstępnej fazy projektowania elementów układów automatyzacji kompleksowej złożonych procesów technologicznych.

Do rozważań przyjęto układ żeliwiaka z rekuperatorem opromieniowanym wolnostojącym z wyodrębnioną komorą spalania gazów żeliwiakowych. W takim układzie można wyodrębnić trzy podstawowe procesy fizykochemiczne, a mianowicie: proces żeliwiakowy¹⁾, proces dopalania gazów w komorze spalania i proces wymiany ciepła w rekuperatorze.

Pomimo, że w niniejszej pracy proces żeliwiakowy nie będzie analizowany, konieczne jest przeanalizowanie powiązań łączących wszystkie te trzy procesy. Powiązania te można przedstawić na schemacie przepływów materiałowo-energetycznych, które dla rozważanego przypadku przedstawiono na rys. 1. Na schemacie tym, dla wyodrębnionych uprzednio trzech procesów, zaznaczono podstawowe wejściowe i wyjściowe wielkości charakteryzujące poszczególne strumienie. Oznaczono przy tym:

W	[kG/godz]	- ilość wsadu metalowego ładowanego do żeliwiaka,
T	[kG/godz]	- ilość topnika ładowanego do żeliwiaka,
K	[kG/godz]	- ilość koksu ładowanego do żeliwiaka,
V_g	[Nm ³ /min]	- natężenie przepływu gazów żeliwiakowych dopływających do komory dopalania,
t_g	[°C]	- temperatura gazów żeliwiakowych,
A_g	[% obj]	- skład chemiczny gazów żeliwiakowych,
ΔV_g	[Nm ³ /min]	- natężenie przepływu gazów żeliwiakowych uchodzących kominem żeliwiaka,
μ'_g	[g/Nm ³]	- stężenie zapylenia w gazach żeliwiakowych,
L_p	[Nm ³ /min]	- natężenie przepływu powietrza do dopalania gazów żeliwiakowych,
t_{Lp}	[°C]	- temperatura powietrza do dopalania gazów żeliwiakowych,
V_s	[Nm ³ /min]	- natężenie przepływu spalin,
μ'_s	[g/Nm ³]	- stężenie zapylenia w spalinach,
A'_s	[% obj]	- skład chemiczny spalin na wejściu do rekuperatora,
A''_s	[% obj]	- skład chemiczny spalin na wyjściu z rekuperatora

1) Procesem żeliwiakowym nazwano tu zespół procesów termodynamicznych i fizykochemicznych zachodzących w żeliwiaku, prowadzących do otrzymania ciekłego metalu o określonych właściwościach.



Rys. 1. Schemat przepływów materiałowo-energetycznych w instalacji żeliwkowej z rekuperatorem opromienionym

t'_s	[°C]	- temperatura spalin na wejściu do rekuperatora,
t''_s	[°C]	- temperatura spalin na wyjściu z rekuperatora,
V_p	[Nm ³ /min]	- natężenie przepływu powietrza dmuchu,
t'_p	[°C]	- temperatura powietrza dmuchu na wejściu do rekuperatora,
t''_p	[°C]	- temperatura powietrza dmuchu na wyjściu z rekuperatora,
δ_{os}	[mm]	- grubość osadu tworzącego się na ściance rekuperatora od strony przepływu spalin,
t_1	[°C]	- temperatura ścianki rekuperatora oddzielającej powietrze i spalinę,
ΔV_{pu}	[Nm ³ /min]	- natężenie przepływu powietrza upuszczanego za rekuperatorem,
$V_{pż}$	[Nm ³ /min]	- natężenie przepływu powietrza dmuchu dopływającego do żeliwiaka,
$t_{pż}$	[°C]	- temperatura powietrza dmuchu dopływającego do żeliwiaka przy pominięciu strat ciepła w otoczenie $t_{pż} = t''_p$,
Q_{str}	[kcal/godz]	- straty ciepła w otoczenie żeliwiaka,
$t_{ż}$	[°C]	- temperatura żeliwa,
$G_{ż}$	[kg/godz]	- natężenie wypływu żeliwa (wydajność żeliwiaka)
$A_{ż}$	[% wag]	- skład chemiczny żeliwa

Poszczególne wielkości charakteryzujące wyodrębnione strumienie, jak to wynika z rys. 1, są ze sobą powiązane w zamkniętym obiegu oddziaływań. Oznacza to, że niektóre wielkości wyjściowe procesu żeliwiakowego są wielkościami wejściowymi procesu dopalania gazów żeliwiakowych, zaś wyjściowe tego procesu są wejściowymi procesu wymiany ciepła w rekuperatorze, natomiast wyjściowe tego z kolei procesu są jednymi z wejściowych wielkości procesu żeliwiakowego. Ponieważ celem sterowania instalacji żeliwiakowej jako całości jest otrzymanie ciekłego żeliwa o żądanych wielkościach, do sterowania procesu żeliwiakowego jako procesu podstawowego należy dostosować sterowania procesów pozostałych. Określa to liczbowo wielkości wejściowe procesu dopalania oraz wyjściowe procesu wymiany ciepła, które są odpowiednio wielkościami wyjściowymi i wejściowymi procesu żeliwiakowego. To określenie może być różne w zależności od celu sterowania procesu żeliwiakowego. Wiadomo bowiem, że mogą być stawiane różne zadania w zależności od założonej technologii topienia, a więc:

- duża wydajność żeliwa przy niezbyt wysokiej jego temperaturze,

- wysoka ustalona temperatura żeliwa przy nieokreślonej dokładnie wydajności,
- wysoka wydajność i maksymalna dla niej temperatura, tzn. regulacja ekstremalna,
- niska temperatura i wysoka wydajność wynikająca z warunków ekonomiczności procesu (procesy duplex),
- określony ściśle skład chemiczny żeliwa, np. zawartości węgla i krzemu itp.

Biorąc to pod uwagę oraz uwzględniając specyfikę procesu żeliwiakowego, a w szczególności cykliczność załadunku, w przypadku ogólnym wielkości łączące żeliwiak z pozostałymi częściami instalacji są zmienne w czasie. Zmiany tych wielkości mogą być tak duże, że materiał konstrukcyjny podstawowych elementów rekuperatora okaże się zbyt mało odporny i rekuperator ulegnie zniszczeniu. Uzasadnia to konieczność sterowania procesów spalania i wymiany ciepła. Jest ono z tych samych przyczyn niezbędne w układach nie posiadających automatycznego sterowania procesu żeliwiakowego.

Dla ustalenia zasad sterowania tych procesów zostanie przeprowadzona analiza zależności pomiędzy charakteryzującymi je wielkościami. Celem tej analizy będzie ustalenie związków między wielkościami wejściowymi i wyjściowymi rozważanych procesów oraz wybranie wielkości nadających się na wielkości nastawiające i sterowane.

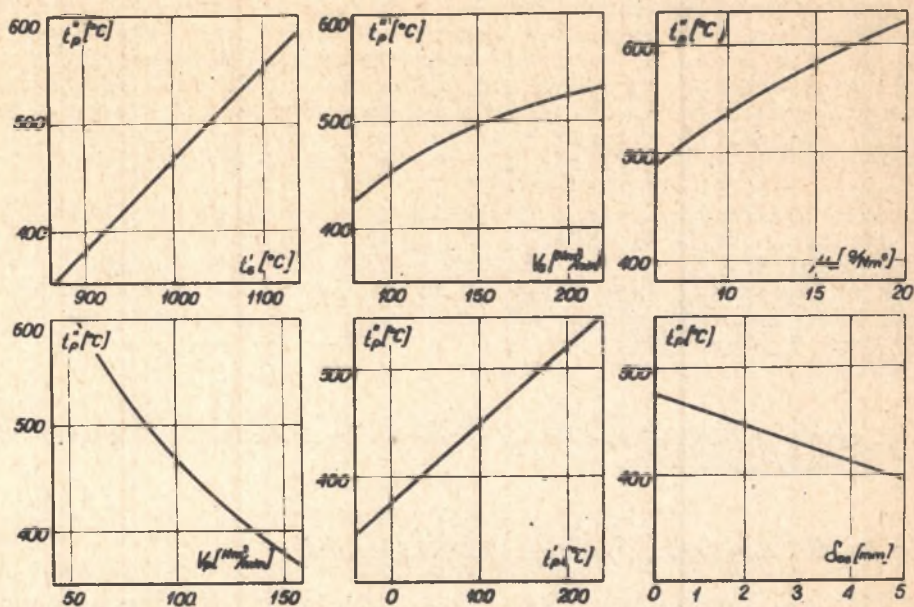
II. Analiza charakterystyk statycznych wyodrebnionych procesów jednostkowych

1. Proces wymiany ciepła w rekuperatorze

W układzie komora dopalania - rekuperator, z punktu widzenia współdziałania z żeliwiakiem, podstawowym procesem jest proces wymiany ciepła w rekuperatorze. Od niego też zostanie rozpoczęta analiza. Proces ten charakteryzuje szereg wielkości wejściowych i wyjściowych rys. 1. Ponadto pośrednio przebieg procesu ograniczają dopuszczalne temperatury materiału podstawowych elementów w rekuperatorze, a w szczególności temperatura ścianki rury wewnętrznej t_1 . Temperatura ta wyznacza ponadto granicę cieplnego obciążenia rekuperatora ze względu na jego trwałość.

Jedyną wielkością wejściową procesu żeliwiakowego, o której decyduje przebieg procesu wymiany ciepła w rekuperatorze jest temperatura nagrzania powietrza t_p . O jej wartości, obok wpływu wielkości technologicznych, decydują parametry konstrukcyjne. Sposób doboru parametrów konstrukcyjnych dla konkretnych wybranych wielkości eksploatacyjnych omówiono w poprzednich publikacjach autorów [1, 2, 3]. W oparciu o zależności matema-

tyczne opisujące przebieg wymiany ciepła, przy sformułowanych tam założeniach i dla wybranych średnich wartości parametrów konstrukcyjnych i wielkości eksploatacyjnych¹⁾ określono wpływ podstawowych wielkości wejściowych procesu wymiany ciepła, a więc: temperatury spalin t'_s , ich ilości V_s , zapylenia μ_s , ilości V_p i temperatury początkowej dmuchu t'_p oraz grubości osadu na ścianie rury wewnętrznej δ_{os} , na temperaturę nagrzania powietrza t''_p - rys. 2. Przy zmianie każdej z rozważanych wielkości dla pozostałych przyjęto wybrane wartości średnie.



Rys. 2. Wpływ podstawowych wielkości wejściowych procesu wymiany ciepła w rekuperatorze przeciwprądowym - ilości spalin V_s , początkowej temperatury spalin t'_s , zapylenia spalin μ_s , temperatury początkowej powietrza dmuchu t'_p jego ilości V_p oraz grubości osadu δ_{os} , na podstawową wielkość wyjściową - temperaturę nagrzania powietrza t''_p

¹⁾ Zgodnie z pracami [1, 2, 3] przyjęto następujące średnie wartości podstawowych parametrów: średnica wewnętrzna rekuperatora $D_1=1300$ mm, wysokość rekuperatora $H=7,5$ m, żebra proste o grubości 5 mm, rozłożone w odległościach 35 mm, wymianą ciepła w przeciwprądzie; oraz następujące podstawowe wielkości: ilość dmuchu $V_p = 100$ Nm³/min, skład gazów żeliwniakowych 12% CO, 14% CO₂, 3% H₂, 71% N₂, dopalane przy nadmiarze powietrza $\lambda = 1,30$, zapylenie spalin $\mu_s = 6$ g/Nm³

Na podstawie materiału zawartego w wymienionych publikacjach można wykonać analogiczne wykresy zależności pomiędzy wielkościami wejściowymi a wyjściowymi dla innych wymiarów rekuperatora i innych zakresów zmian poszczególnych wielkości. W oparciu o te zależności zostanie przeprowadzona analiza wyboru wielkości nastawianej, przez zmianę której będzie można przeciwstawić się zakłóceniom procesu wymiany ciepła, wywołanym przez zmiany wielkości pozostałych. Wszystkie z wymienionych wyżej wielkości, z wyjątkiem ilości dmuchu V_p i jego temperatury początkowej t'_p , są zależne od przebiegu procesu dopalania w komorze spalania. Jednocześnie w dotychczasowej praktyce czyni się próby sterowania procesem wymiany ciepła poprzez sterowanie procesem dopalania, stosując jako wielkość nastawianą ilość powietrza do dopalania gazów L_p , wpływającą przede wszystkim na temperaturę spalin t'_s . Z tego względu, przed przystąpieniem do analizy wyboru wielkości nastawianych dla procesu wymiany ciepła w rekuperatorze, zostaną rozważone zależności między wielkościami charakteryzującymi proces dopalania w komorze spalania.

2. Proces dopalania w komorze spalania

a. Omówienie ogólne

Na przebieg procesu dopalania w komorze spalania wpływają jego wielkości wejściowe, głównie skład A_g i temperatura t_g gazów żeliwiakowych i ich ilości V_g oraz ilość powietrza do dopalania L_p . Skrajne wartości powyższych wielkości wynikają z warunków koniecznych dla palenia się gazów. Trudno podać jednoznacznie te warunki, ponieważ wpływają na nie takie elementy jak obecność palnika, sposób wymieszania gazów z powietrzem, zawartość pary wodnej w gazie, temperatura ścianek komory spalania [4, 5].

Głównymi wielkościami wyjściowymi omawianego procesu są ilość spalin V_s oraz temperatura spalin t'_s . Ich wartości, jak wynika z przedstawionych na rys. 2 wykresów, silnie wpływają na wynik procesu wymiany ciepła, przy tym stosunkowo silniej wpływa temperatura spalin t'_s . O ile zmiany ilości spalin V_s są prawie proporcjonalne do zmian ilości gazów V_g doprowadzonych do komory spalania (rys. 3 i rys. 7) oraz ilości powietrza do ich dopalania, to na temperaturę spalin t'_s wpływ wielkości

wejściowych jest bardziej skomplikowany¹⁾. Ze względu na konieczność jednoznacznego porównania wpływu poszczególnych wielkości wejściowych na temperaturę t'_s , rozważania zostaną oparte o wykresy na rys. 4, 5, 6 przedstawiające zależności w układach - temperatura spalania t'_s , ilość powietrza do dopalania L_p . Ilość powietrza L_p określa jednocześnie współczynnik nadmiaru powietrza do dopalania λ .

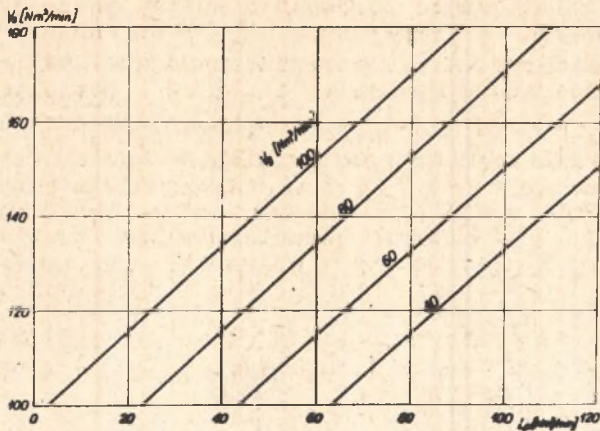
Na wykresach rys. 4, 5, 6 przedstawiono krzywe teoretyczne spalania zgodnie z ogólnymi założeniami poczynionymi w pracach poprzednich [1, 2]. Krzywe charakteryzujące przebiegi rzeczywiste będą przesunięte nieco w prawo, ze względu na niepełne wymieszanie gazów z powietrzem oraz w dół, ze względu na straty ciepłe w samej komorze spalania. Charakter krzywych oraz wzajemne ich położenie przy zmianach poszczególnych wielkości pozostają jednak w zasadzie zachowane. Na podstawie schematu przepływów materiałowo-energetycznych na rys. 1 oraz powyżej omówionych powiązań procesu dopalania w komorze spalania z procesami żeliwiakowymi i wymiany ciepła w rekuperatorze można do dalszej analizy wstępnie przyjąć, że wielkością sterowaną procesu spalania może być temperatura t'_s , a nastawianą ilość powietrza do dopalania L_p oraz ilość gazów V_g doprowadzonych do komory spalania. Pozostałe wielkości jak temperatura t_g i skład gazów A_g będą wtedy zakłóceniami. W układach gdzie nie jest możliwe zamierzone nastawianie ilości gazów V_g dopływających do komory spalania, wielkość ta będzie również zakłóceniem dla procesu dopalania.

Rozpatrzmy kolejno możliwości oddziaływania na wymienione zakłócenia. W zamkniętym układzie sterowania temperatury spalin t'_s poprzez zmiany ilości powietrza dopalania L_p i ilości gazów V_g , czyli w układzie regulacji temperatury spalin t'_s w procesie dopalania, temperatura ta będzie wielkością regulowaną, a ilość powietrza dopalania L_p i ilość gazów V_g wielkościami nastawianymi.

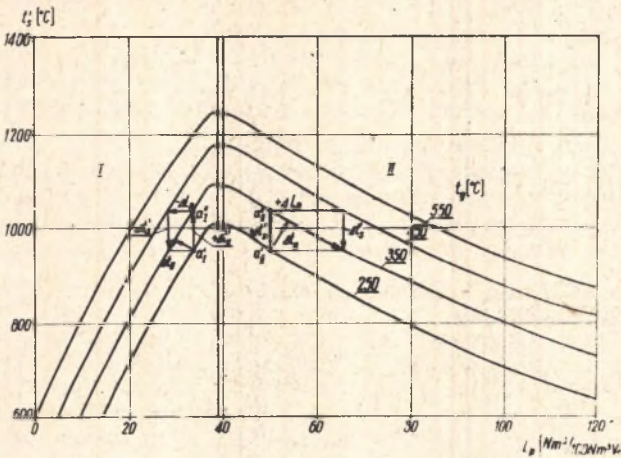
b. Wpływ zmian temperatury gazów żeliwiakowych na przebieg procesu dopalania

W przypadku, gdy zakłóceniem procesu dopalania będzie zmiana temperatury gazów t_g (rys. 4), to przy stałej ilości powie-

¹⁾ Wykreśły na rys. 3÷7 wykonano dla następujących średnich wartości podstawowych wielkości: skład A_g gazu żeliwiakowego: $CO\% = 15$, $CO_2\% = 12$, $N_2\% = 74$, ilość gazów powstała, w żeliwiaku z $100 \text{ Nm}^3/\text{min}$ powietrza dmuchu $V_{g \text{ max}} = 108 \text{ Nm}^3/\text{min}$, temperatura gazów $t_g = 350^\circ\text{C}$, ilość powietrza do dopalania $L_p = 60 \text{ Nm}^3/\text{min}$, co odpowiada współczynnikowi nadmiaru powietrza $\lambda = 1,5$.



Rys. 3. Ilość spalin V_g w zależności od ilości gazów żeliwiakowych V_g i ilości powietrza do dopalania L_p dla gazu o składzie A_g : $\text{CO}\% = 15$, $\text{CO}_2\% = 12$, $\text{N}_2\% = 73$



Rys. 4. Zależność temperatury spalin t'_s od temperatury gazów żeliwiakowych t_g oraz ilości powietrza do dopalania L_p dla pełnego wykorzystania gazów $V_g = 100\% V_{g \text{ max}}$ o składzie A_g : $\text{CO}\% = 15$, $\text{CO}_2\% = 12$, $\text{N}_2\% = 73$

wietrza L_p wywoła ona tylko zmianę temperatury spalin t'_s . Po szczególne krzywe dla różnych temperatur gazów t_g w układzie t'_s, L_p ze wzrostem t_g są przesunięte równolegle w stronę wzrastających t'_s . Sposób przeciwdziałania zakłóceniu rozważmy na przykładzie. Niech w warunkach określonych na rys. 4 w zakresie II punktem a_{II} temperatura gazów t_g ulegnie zmianie o wartość Δt_g . Wtedy temperatura spalin t'_s wzrośnie o wartość $\Delta t'_s$. Dla sprowadzenia temperatury spalin z powrotem do wartości t'_s o wartość $-\Delta t'_s$, konieczne jest powiększenie ilości powietrza dopalania o wartość odciętej ΔL_p , co odpowiada przesunięciu wzdłuż krzywej $(t_g + \Delta t_g) = \text{const}$. Jeżeli taka sama zmiana Δt_g nastąpi w warunkach niecałkowitego spalania (obszar I, punkt a_I), to dla sprowadzenia temperatury spalin do wartości początkowej konieczne jest zmniejszenie ilości powietrza do dopalania o wartość ΔL_p . Wynika z tego, że zależności pomiędzy zmianami ilości powietrza do dopalania L_p a temperaturą spalin t'_s są przeciwne po obu stronach maksimów krzywych, czyli odpowiednio w zakresach I i II. Ponieważ w zakresie I pochylenie krzywych L_p, t'_s jest większe niż w zakresie II, proces regulacji w zakresie I będzie charakteryzował się większą czułością, ale jednocześnie mniejszą dokładnością. Wiadomo, że zwykły układ regulacji może pracować tylko w warunkach jednoznacznej zależności wielkości nastawianej i sterowanej, dlatego też przy użyciu ilości powietrza dopalania L_p jako wielkości nastawianej konieczne jest wybranie dla sterowania jednego z omawianych zakresów.

Ze względu na istniejące rozwiązania konstrukcyjne żeliwiaków i występujące w związku z tym w I zakresie takie zjawiska, jak: przewlekłość spalania, niebezpieczeństwo zaistnienia wybuchów oraz zassanie znacznej ilości powietrza L_p przez nie szczelności, powodują łatwe przejście układu sterowania w zakres II. Zrealizowanie regulacji takiego procesu przy pomocy zwykłego układu sterowania w tym zakresie byłoby trudne.

Praktycznie do realizacji zwykłego układu sterowania rozpatrywanego procesu nadaje się zakres II. Zastosowanie adaptacyjnych układów sterowania, jak np. układu regulacji ekstremalnej pozwoliłoby na realizację sterowania na granicy zakresów I i II.

c. Wpływ zmian układu gazów żeliwiakowych na przebieg procesu dopalania

Przypadek, kiedy zakłóceniami procesu dopalania są zmiany składu gazów żeliwiakowych A_g rozpatrzone na rys. 5. Dla uproszczenia analizy pominięto występujące w niewielkich ilo-

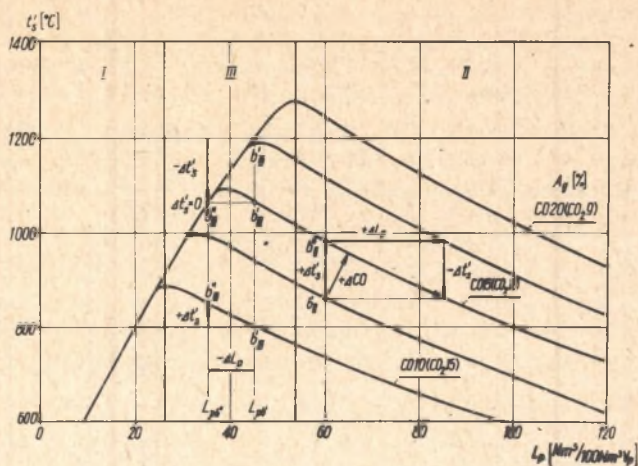
ściach w gazach żeliwiakowych wodór, tlen i SO_2 . Jak widać z rys. 5, po lewej stronie maksimów odpowiadających poszczególnym zawartościom CO zmiany zawartości CO w gazach nie mają wpływu na temperaturę t'_s . Natomiast po prawej stronie maksimów ze wzrostem ilości CO w gazach wzrasta temperatura spalin t'_s . O jej wartości w tym zakresie decyduje tylko ilość powietrza do dopalania. Jeżeli przyjmiemy do analizy możliwość zmian CO od 10 do 20%, to z punktu widzenia sterowania trzeba wyodrębnić trzy zakresy (rys. 5). W zakresie I temperatura spalania t'_s jest zależna tylko od ilości powietrza L_p .

Prześcięty zakres III nie nadaje się do realizacji zwykłego układu sterowania poprzez zmiany powietrza do dopalania L_p , ponieważ przy tej samej zmianie ΔL_p od wartości L_{pb} do L_{pb} w zależności od składu gazu uzyskać można albo zmniejszenie temperatury spalin t'_s o wartość $-\Delta t'_s$ (dla CO = 20% od punktu b'''_{III} do punktu b''_{III}), albo temperatura t'_s nie ulegnie zmianie, tzn. $\Delta t'_s = 0$ (dla CO = 15% od punktu b'_{III} do punktu b''_{III}), lub t'_s ulegnie zwiększeniu o $+\Delta t'_s$ (dla CO = 10% od punktu b'_{III} do punktu b''_{III}).

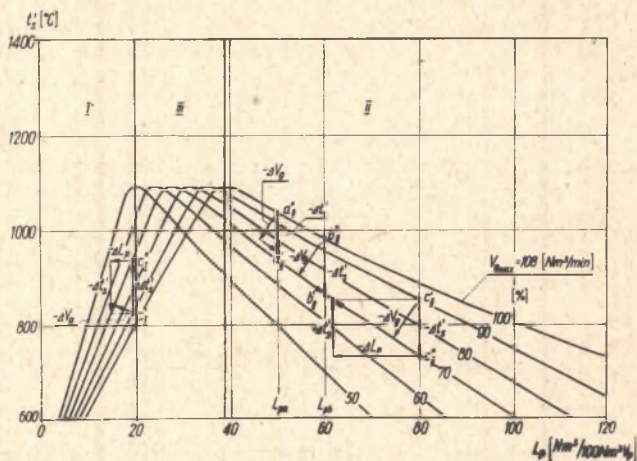
W zakresie II sposób przeciwdziałania zakłóceniom wskutek zmian składu gazów jest analogiczny jak wskutek rozważanych uprzednio zmian ich temperatury (rys. 4 - zakres II). Jednak już przy niewielkich zmianach składu, na przykład dla punktu b'_{II} (12,5%) do b''_{II} (15% CO) trzeba przeciwdziałać bardzo dużymi zmianami ilości powietrza L_p . Przy regulacji w tym zakresie należałoby zastosować dla L_p wentylator o wydajności bliskiej do ilości dmuchu powietrza dla żeliwiaka. Użycie wentylatorów o niewystarczającej wydajności powoduje przesunięcie układu w zakresie III i może prowadzić do wniosku o niecelowym stosowaniu sterowania w zwykłym układzie przy pomocy zmian ilości powietrza L_p .

d. Wpływ zmian ilości gazów żeliwiakowych na przebieg procesu dopalania

Przypadek, kiedy zakłóceniem lub wielkością nastawianą procesu dopalania będzie ilość gazów V_g rozważano na rys. 6. Rysunek ten przedstawia przebiegi zależności t'_s , L_p dla różnych ilości gazów V_g wyrażonych w procentach od całej wytwarzanej w żeliwiaku ilości - równej dla przyjętych parametrów $V_{g\max} = 108 \text{ Nm}^3/\text{min}$. Jeżeli potraktujemy zmianę ilości gazów V_g jako zakłócenie, a ilość powietrza L_p jako wielkość nastawia-



Rys. 5. Zależność temperatury spalin t'_s od składu gazów żeliwniakowych A_g oraz ilości powietrza do dopalania L_p dla pełnego wykorzystania gazów $V_g = 100$ V_g max o temperaturze $t_g = 350^\circ\text{C}$



Rys. 6. Zależność temperatury spalin t'_s od ilości gazów V_g , wyrażonej w procentach całkowitej ilości wytworzonej w żeliwniaku V_g max oraz ilości powietrza do dopalania L_p , dla gazu o składzie A_g : $\text{CO}\% = 15$, $\text{CO}\% = 12$, $\text{N}_2\% = 73$ i temperaturze $t_g = 350^\circ$

ną, to podobnie jak w poprzednim przypadku wyróżnić można trzy zakresy I, II, III. Granice tych zakresów wyznaczają przyjęte do analizy zakresy zmian ilości gazów. Jeżeli zakres zmian V_g , jako zakłócenia, przyjmą od 50 do 100% $V_{g \max}$, to omawiane granicę przejdą przez maksima krzywych odpowiadających ich skrajnym wartościom. Na rys. 6 zaznaczono podział na zakresy przy przyjętych zmianach ilości gazów od 50 do 100% $V_{g \max}$.

W zakresie I, na przykład w punkcie c_I , zmniejszenie ilości gazów o wielkość $-\Delta V_g$ od punktu $c'_I = 90\%$ do punktu $c''_I = 70\%$ powoduje podwyższenie temperatury spalin t'_s o $+\Delta t'_s$. Dla sprowadzenia temperatury spalin do wielkości początkowej t'_s trzeba zmniejszyć ilość powietrza o $-\Delta L_p$. W zakresie II (punkt c_{II}) zmniejszenie ilości gazów o $-\Delta V_g$ powoduje zmniejszenie temperatury spalin o $-\Delta t_s$, a więc w kierunku przeciwnym niż w zakresie I. Dla sprowadzenia temperatury do warunków początkowych należy również zmniejszyć ilość powietrza o wartość ΔL_p . Podobnie jak w przypadku zakłóceń od zmiany temperatury gazów t_g , przeciwdziałanie zmianom ilości gazów V_g , poprzez zmiany ilości powietrza dopalania L_p , wymaga znacznie mniejszych ich wartości w zakresie I, niż w zakresie II. Zakres III, który, jak w przypadku zmian składu gazów charakteryzuje się różnym kierunkiem wpływu tych samych zmian ilości powietrza dopalania L_p przy różnych ilościach gazów V_g , jest dla realizacji zwykłego układu sterowania nieprzydatny. Będzie w nim natomiast przebiegał proces sterowania w układzie ekstremalnym.

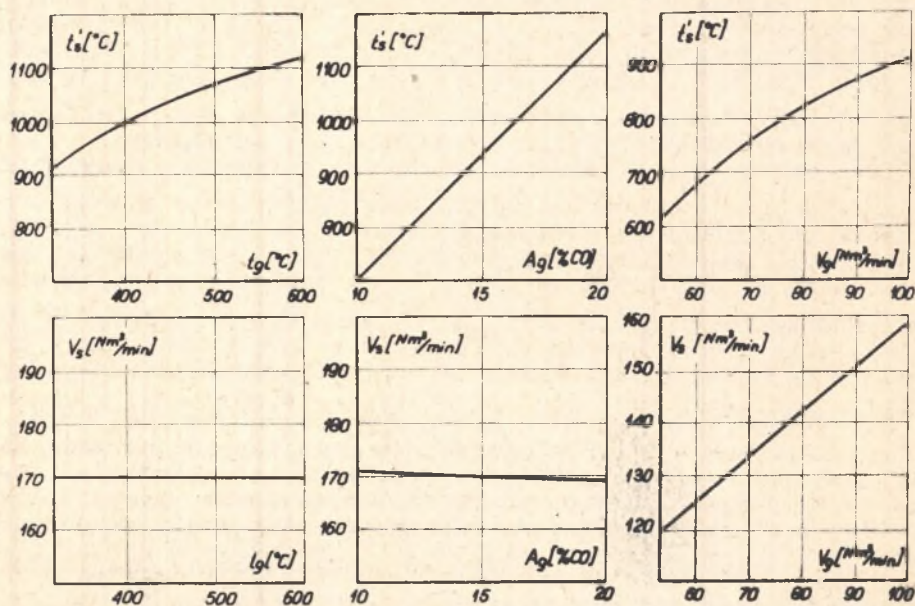
Ilość gazów V_g , w odróżnieniu od dwu poprzednio omówionych wielkości, może być również wielkością nastawianą, jeżeli rozwiązanie konstrukcyjne połączenia komory spalania z żeliwnikiem pozwoli na świadome sterowanie ich ilością. Przyjmując zakres ilości gazów od 50% do 100% $V_{g \max}$ jako zakres zmian wielkości nastawianej, można wyróżnić te same trzy zakresy sterowania, jakie wyznaczono uprzednio na rys. 6. W zakresie I bowiem zmniejszenie ilości gazów V_g przy $L_p = \text{const}$ powoduje wzrost temperatury t'_s , zaś w zakresie II jej zmniejszenie, a więc w zakresach I i II zależności są przeciwne. W zakresie III zrealizowanie zwykłego układu sterowania jest niemożliwe ze względu na różne kierunki zależności, tzn. takim samym co do wartości i kierunku zmianom ilości gazów ΔV_g dla różnych wartości V_g odpowiadają przyrosty lub zmniejszenia temperatury spalin przy $L_p = \text{const}$.

Rozważmy teraz możliwości kompensowania zmian temperatury t'_s wywołanych zmianami temperatury gazów t_g , omówionych u-

przednio przy rys. 4 (punktu a_{II}) oraz wywołanych zmianami składu na rys. 5 (punktu b_{II}). Dla pierwszego przypadku w punkcie a_{II} na rys. 6 odpowiadającym punktowi a_{II} z rys. 4, dla uzyskania kompensującej zmiany temperatury t'_s o wartości $\Delta t'_s$ do punktu a_{II} (czyli o wartości bezwzględnej $\Delta t'_s$ tej samej jak na rys. 6, ale o znaku przeciwnym) wystarczy zmniejszenie ilości gazów V_g o wartość $-\Delta V_g$ (od 100 do 75% $V_{g \max}$). Dla drugiego przypadku w punkcie b_{II} (rys. 6), odpowiadającym punktowi b_{II} z rys. 5, analogicznie wystarczy zmniejszenie ilości gazów V_g o inną wartość $-\Delta V_g$ (od 100 do 70%). W obu przypadkach założono stałą wartość ilości powietrza do dopalania $L_p = \text{const}$, której wartość leży w zakresie II, czyli w zakresie jednoznacznego oddziaływania wielkości nastawianej na wielkość sterowaną.

e. Podsumowanie

Podsumowując przeprowadzoną powyżej analizę możliwości sterowania procesu dopalania, na rys. 7 przedstawiono wpływy po-



Rys. 7. Wpływ podstawowych wielkości wejściowych procesu dopalania - temperatury gazów t_g , składu gazów A_g (CO%) i ich ilości V_g na podstawowe wielkości wyjściowe - temperaturę spalin t'_s i ilość spalin V_s

szczególności wielkości wejściowych, a więc temperatury gazów t_g , składu gazów A_g i ilości gazów V_g (przy innych wielkościach ustalonych) na ilość V_s i temperaturę spalin t'_s . Wykresy na tym rysunku, wraz z rys. 3 oraz omówionymi wyżej rys. 4, 5, 6, mogą stanowić podstawę wyboru wielkości nastawianej i sterowanej w procesie dopalania oraz wpływu zakłóceń na wybrany parametr sterowany. W połączeniu z wykresami na rys. 2 mogą one stanowić podstawę dla wyboru układu sterowania kompleksowego procesów dopalania i wymiany ciepła.

3. Powiązanie procesu wymiany ciepła z procesem dopalania

Jednoznacznego wyboru układu sterowania można jednak dokonać dopiero wtedy, gdy ustali się chociażby w przybliżeniu zakresy zmian poszczególnych wielkości jakie charakteryzują sterowane procesy. Przy wstępnym projektowaniu trudno ściśle te zakresy ustalić, dlatego ocena liczbowa wpływu wybranych wielkości wejściowych na wielkości wyjściowe może w tej fazie być tylko orientacyjna. Na przykład przy ocenie liczbowej wpływu poszczególnych wielkości wejściowych procesu wymiany ciepła na wybraną za wielkość sterowaną temperaturę t''_p , dla określonej konstrukcji rekuperatora (rys. 2) przyjęto dla t'_s zakres zmian $\Delta t'_s = 200^\circ\text{C}$, ($t_s = 900 \div 1100$). Tym zmianom odpowiada zakres zmian $\Delta t''_p = + 160^\circ\text{C}$. Podobnie zmianom:

$\Delta V_s = 70 \text{ Nm}^3/\text{min}$	($V_s = 100 \div 170$)	odpowiada	$t''_p = + 60^\circ\text{C}$,
$\Delta \mu_s = 10 \text{ g/Nm}^3$	($\mu_s = 5 \div 15$)	"	$t''_p = + 100^\circ\text{C}$,
$\Delta V_p = 70 \text{ Nm}^3/\text{min}$	($V_p = 50 \div 120$)	"	$t''_p = - 180^\circ\text{C}$,
$\Delta t'_p = 50^\circ\text{C}$	($t'_p = -20 \div +30$)	"	$t''_p = + 50^\circ\text{C}$,
$\Delta \delta_{os} = 5 \text{ mm}$	($\delta_{os} = 0 \div 5$)	"	$t''_p = - 90^\circ\text{C}$.

Przyjmując inne zakresy zmian poszczególnych wielkości otrzymuje się inne zakresy zmian wielkości sterowanej. Oczywiście jest zatem, że wszelkie oceny liczbowe skutków poszczególnych wpływów, bez szczegółowego sprawdzenia w praktyce zakresu oddziaływań, nie reprezentują rzeczywistych zależności. Nie mniej jednak, nawet szacunkowo określone liczbowe oceny wpływów w wstępnej fazie projektowania układu sterowania są pomocne przy wyborze wielkości nastawianych, szczególnie w przypadkach, kiedy jest wiele wielkości zmiennych, jak w omawianym układzie rekuperator - komora spalania.

Dla określenia wzajemnych powiązań w tym układzie w tabl. 1 zestawiono, zmieniające się w czasie, wejściowe i wyjściowe wielkości procesu wymiany ciepła i procesu dopalania. Część

Tablica 1

Zależności między podstawowymi wielkościami wejściowymi i wyjściowymi procesów wymiany ciepła i dopalania

t_s'' ○	+1	+1	-1	-2	+1	+2	Objasnienia: + zależności proporcjonalne - zależności odwrotnie proporcjonalne 0+5 ocena wielkości wpływu ○ pomiar ciągły □ nastawianie
t_1 ○	-2	+1	-4	+3	+3	+5	
t_p'' ○	-2	+1	-4	+3	+2	+4	
wielkości wyjściowe wielkości wejściowe	δ_{os}	○	○ □	μ_{ts}	V_s	t_s'	wielkości wyjściowe wielkości wejściowe
				0	0	+3	t_g ○
				0	-1	+5	CO ○
				+2	+5	+4	V_g □
				-3	+3	+5(I) -4(II)	L_p ○ □
Proces dopalania							
Uwagi: (I) zakres spalania niecałkowitego (II) spalanie z nadmiarem powietrza							

wielkości wyjściowych procesu dopalania jest przy tym wielkościami wejściowymi procesu wymiany ciepła. Biorąc pod uwagę te powiązania można traktować oba procesy jako jeden łączny proces, w którym część wielkości wejściowych jest wielkościami wielkościami procesu dopalania, natomiast wielkościami wyjściowymi są wyjściowe wielkości procesu wymiany ciepła. Wpływ wielkości wejściowych na wyjściowe w poszczególnych procesach szacunkowo określono używając następujących oznaczeń: 0 - bez wpływu, 1 - bardzo mały, 2 - mały, 3 - średni, 4 - duży, 5 - bardzo duży wpływ, przy czym "+" oznacza zależność wprost proporcjonalną, "-" zależność odwrotnie proporcjonalną. W tablicy zaznaczono również, które z wielkości mogą być sterowane oraz wielkości których wartości można mierzyć w sposób ciągły ogólnie dostępnymi obecnie środkami pomiarowymi.

Rozpatrując oba procesy jako jeden obiekt sterowania z temperaturą nagrzania powietrza t_p'' jako wielkością sterowaną, na podstawie tablicy widoczne jest, że wielkościami nastawianymi mogą być ilość dmuchu V_p , ilość gazów V_g oraz ilość powietrza do dopalania L_p . Dwie ostatnie wielkości oddziałują na proces wymiany ciepła pośrednio przez zmiany - temperatury spalin t_s' , ilości spalin V_s i stężenie zapylenia μ_s . Z wielkości tych tylko t_s' można łatwo zmierzyć. Biorąc ponadto pod uwagę przedstawione oceny wpływu poszczególnych wielkości, widoczne są trudności sterowania procesu wymiany ciepła w układzie sterowania otwartego poprzez stabilizowanie t_s' . Zmiany L_p , jak i V_g powodują zmiany zarówno t_s' , V_s jak i μ_s , z których wszystkie wpływają na t_p'' (rys. 2).

Należy również zauważyć, że silnie wpływające na przebieg procesu spalania zmiany t_g i A_g (CO) trzeba przyjąć jako zakłócenia procesu, ponieważ w istniejących instalacjach nie można wpływać na ich wartości. Należy zatem z tego punktu widzenia dążyć do ich stabilizowania w procesie żeliwiakowym. Jeszcze silniej wiąże proces żeliwiakowy z rozważanym układem ilość dmuchu V_p . Ilość dmuchu V_p z punktu widzenia sterowania procesu wymiany ciepła wydaje się najlepszą wielkością nastawianą, ponieważ jednak jej zmiany jako wielkości nastawianej w procesie wymiany ciepła byłyby zakłóceniami procesu żeliwiakowego, użycie jej wymaga zastosowania upustu między rekuperatorem a żeliwiakiem (rys. 1).

W tablicy 1 oceniono również wpływ poszczególnych wielkości wejściowych procesu wymiany ciepła na temperaturę spalin t_s' oraz temperaturę ścianki t_1 . Pierwsza charakteryzuje w pewnym stopniu sprawność energetyczną rekuperatora, druga decyduje o jego trwałości. Przy ostatecznym wyborze układu sterowania należy zatem rozważyć wpływ zmian zachodzących w procesie na te wielkości.

III. Zakończenie

Dla ostatecznego wyboru sposobu realizacji sterowania konieczne jest ponadto uprzednie określenie dynamicznych zależności pomiędzy powyżej wytypowanymi wielkościami [6]. Dokonanie tego metodami analitycznymi byłoby praktycznie bardzo trudne, natomiast dla ich ustalenia doświadczalnego konieczne jest uprzednie odpowiednie przygotowanie instalacji do badań. Prace w tym zakresie zostały podjęte między innymi w Katedrze Technologii Metali Politechniki Łódzkiej. Obejmują one przede wszystkim opanowanie zagadnień związanych z zapewnieniem należytej trwałości rekuperatora, wybór aparatury pomiarowej, kontrolę oraz próby ręcznego sterowania procesów zachodzących w instalacji żeliwiakowej. Jednak już obecnie na podstawie przedstawionych w zarysie w niniejszej pracy charakterystyk statycznych procesów oraz biorąc pod uwagę przedstawione w tabl.1 możliwości pomiarów i nastawiania, można sformułować konkretne propozycje układów kompleksowego sterowania automatycznego. Temat ten został podjęty przez autorów i będzie przedstawiony w następnych opracowaniach.

LITERATURA

- [1] Szreniawski J., Jopkiewicz A.: "Rekuperatory opromieniowane do żeliwiaków". MPC - ZPWO, Łódź 1962.
- [2] Szreniawski J., Jopkiewicz A.: "Drogi powiększenia trwałości rekuperatorów opromieniowanych" Przegląd Odlewnictwa 1964 nr 11, str. 1-7.
- [3] Jopkiewicz A.: "Wpływ niektórych czynników na pracę rekuperatora opromieniowanego w instalacji żeliwiakowej" Rozprawa doktorska na Wydz. Mech. Politechniki Łódzkiej 1965r.
- [4] Sin M.K.: "Wospłameńejemost wagranczych gazow" Litlejnoje Proizvodstvo 1964 nr 9.
- [5] Schmitt H., Frank E.: Brennbarkeit van Kupolofen-Gidstgawen bei verschiedenen Feuchtigkeitsgehalten und Temperaturen. Giesserei, 1965 nr 7 str. 197+200.
- [6] Tuszyński K.: "Automatyczna regulacja operacji jednostkowych" WNT Warszawa 1961.

АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ
В ИНСТАЛЛЯЦИИ ВАГРАНОК С ТРУБЧАТЫМ РЕКУПЕРАТОРОМ
С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Р е з ю м е

Для выделенных процессов теплового обмена и сжигания газов в камере сжигания ваграночной инсталляции с трубчатым рекуператором, определена зависимость между основными входными и выходными параметрами отдельных потоков сырья и энергии.

Эти зависимости представлены в виде статических характеристик процессов. На основе этих характеристик сделан анализ возможностей автоматического управления этими процессами с учетом их связи с ваграночным процессом.

Выяснены причины безуспешных попыток в управлении процессом сжигания ваграночных газов при помощи изменения количества воздуха для их сжигания, а также представлены новые возможности управления этим процессом.

ANALYSIS OF SOME PROCESSES TAKING PLACE IN THE CUPOLA
WITH A RADIATED RECUPERATOR, FROM THE AUTOMATIC CONTROL
STANDPOINT

S u m m a r y

For some isolated processes of heat exchange in the recuperator and for gases afterburning in the combustion chamber, interdependences between the basic input and output quantities of individual energy jets have been determined.

This dependences were presented in the shape of statical characteristics of processes.

On the ground of these characteristics an analysis of automatic control of these processes has been carried out. Their linking with the cupola process has been taken into account.

The reasons for failures of cupola gases combustion control by means of air quantity changes used to their afterburning, have been explained and the new possibilities of control of this process have been presented.