
INŻYNIERIA CHEMICZNA


PIECE W PRZEMYŚLE CHEMICZNYM
I PRZEMYSŁACH POKREWNYCH

Seria wydawnicza, Inżynieria chemiczna, realizowana przez Państwowe Wydawnictwa Techniczne, jest pomyślana jako podstawowa biblioteka każdego inżyniera chemika i inżyniera mechanika specjalizującego się w projektowaniu i budowie aparatury chemicznej.

Seria ta obejmuje prace poświęcone poszczególnym operacjom inżynierii chemicznej, maszynoznawstwu chemicznemu oraz ogólnym zagadnieniom technologii chemicznej, jak projektowanie, obliczenia inżynierskie, termodynamika, kinetyka, kataliza itp.

W skład tej serii wchodzi zarówno prace oryginalne czołowych specjalistów polskich, jak i tłumaczenia wartościowych prac obcych.

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWA TECHNICZNE

Arch. 2707 

Prof. inż. STANISŁAW NIEWIADOMSKI

PIECE
W PRZEMYSŁE CHEMICZNYM
I PRZEMYSŁACH POKREWNYCH



WARSZAWA 1961

PANSTWOWE WYDAWNICTWA TECHNICZNE

Redaktorzy naukowi PWT
mgr Irena Gajewska, mgr Irena Senderacka

W książce podano ogólne wiadomości o piecach przemysłowych, procesach w nich przebiegających i o paliwie stosowanym do ich ogrzewania. Opisano w niej różne typy palenisk i generatorów, zamieszczono ich bilanse materiałowe oraz cieplne. Omówiono również szczegółowo ruch gazów i wykorzystanie ciepła w piecach, konstrukcje i działanie pieców stosowanych w przemyśle chemicznym i przemysłach pokrewnych oraz podano stosowane materiały ceramiczne, opis budowy pieców, ich kontroli oraz regulacji pracy.

Książka przeznaczona jest dla słuchaczy wyższych uczelni technicznych, inżynierów i techników, zatrudnionych w przemyśle chemicznym, ceramicznym i metalurgicznym.



19278

WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE

Printed in Poland

Redaktor techniczny Halina Fiećko

SPIS TREŚCI

ROZDZIAŁ I. TECHNIKA I OGÓLNE ZASADY SPALANIA PALIWA W PIECACH

	Str.
1. Wstęp	7
2. Ogólny schemat pieca	8
3. Technika spalania paliwa w piecach	12
4. Paleniska półgazowe	17
5. Rozkład temperatur i atmosfera w komorze roboczej pieca	20

ROZDZIAŁ II. RUCH GAZÓW W PIECACH

1. Wstęp	23
2. Podstawy teoretyczne ruchu gazów	28
3. Opory ruchu gazów	38
4. Urządzenia do wytwarzania ciągu. Kominy	50
5. Ruch gazów w komorze roboczej i w innych częściach pieca	56

ROZDZIAŁ III. WYKORZYSTANIE CIEPŁA W PIECU

1. Wstęp	64
2. Wymiana ciepła w komorze roboczej pieca	67
3. Bilanse pieców. Bilans materiałowy	79
4. Bilans cieplny	85

ROZDZIAŁ IV. WYKORZYSTANIE CIEPŁA GAZÓW ODLOTOWYCH

1. Wstęp	104
2. Rekuperatory metalowe z rur gładkich	107
3. Rekuperatory metalowe z rur iglastych	116
4. Rekuperatory ceramiczne	126
5. Obliczanie rekuperatorów	132
6. Regeneratory	135
7. Obliczanie regeneratorów	143
8. Kotły parowe do odzyskiwania ciepła gazów odlotowych	149

ROZDZIAŁ V. PIECE SZYBOWE

1. Wiadomości ogólne o piecach szybowych	153
2. Piece szybowe do wypalania wapna	158
3. Piece szybowe do wypalania materiałów ceramicznych oraz do prażenia tlenków i siarczków metali	168

ROZDZIAŁ VI. PIECE KOMOROWE I KRĘGOWE

1. Wiadomości wstępne	176
2. Piece jedno- i dwukomorowe	178
3. Piece kręgowe i wielokomorowe	186

ROZDZIAŁ VII. PIECE TUNELOWE

1. Wiadomości wstępne	195
2. Części składowe pieców tunelowych	199
3. Odmiany konstrukcyjne pieców tunelowych	203
4. Schemat obliczania pieców tunelowych	207

ROZDZIAŁ VIII. PIECE TYGLOWE, DONICOWE I WANNOWE

1. Wiadomości wstępne. Piece tyglowe	212
2. Piece donicowe	216
3. Szklarskie piece wannowe	221
4. Wannowe piece metalurgiczne	229

ROZDZIAŁ IX. PIECE OBROTOWE

1. Wiadomości wstępne	233
2. Szczegóły konstrukcyjne pieców obrotowych	234
3. Piece obrotowe do prażenia siarczków i wypalania klinkieru cementowego	241

ROZDZIAŁ X. PIECE RETORTOWE, MUFLOWE I PIECE Z ATMOSFERĄ OCHRONNĄ

1. Wiadomości wstępne	247
2. Piece retortowe (gazownicze i koksownicze)	249
3. Piece mufłowe	257
4. Piece mufłowe oraz piece z atmosferą ochronną do cieplnej i termochemicznej obróbki przedmiotów stalowych	263

ROZDZIAŁ XI. PIECE DO PRAŻENIA SIARCZKÓW METALI W CIENKIEJ WARSTWIE, W ZAWIESINIE I W STANIE FLUIDALNYM

1. Piece do prażenia w cienkiej warstwie	270
2. Piece do prażenia w zawieszynie	274
3. Piece fluidyzacyjne	278

ROZDZIAŁ XII. KONTROLA PRACY PIECÓW

1. Kontrola przez bezpośrednią obserwację oraz za pomocą przyrządów kontrolno-pomiarowych	284
2. Kontrola temperatury, ciśnienia i innych parametrów wpływających na pracę pieców	286
3. Ogólne wiadomości o automatycznej regulacji pieców przemysłowych	289
Literatura	292

TECHNIKA I OGÓLNE ZASADY SPALANIA PALIWA W PIECACH

1. Wstęp

Piecami nazywa się takie urządzenia przemysłowe, w których przeprowadza się ogrzewanie materiałów różnego rodzaju i następnie przetrzymywanie ich przez pewien okres czasu w odpowiednio wysokiej temperaturze, koniecznej dla właściwego przebiegu reakcji chemicznych i przemian fizycznych, wymaganych przez proces technologiczny.

Na przykład w piecach ceramicznych przebiega proces wypalania surowych wyrobów ceramicznych, podczas którego zachodzą w nich kolejno: suszenie, wydzielanie się wody krystalicznej, tworzenie się złożonych krzemianów i glinianów oraz spiekanie. Powoduje to utrwalenie kształtu wyrobów, wzrost ich odporności na wpływy atmosferyczne i znaczne powiększenie wytrzymałości mechanicznej.

W piecach wapiennych w odpowiednio wysokiej temperaturze przeprowadza się rozkład węglanu wapniowego w celu otrzymania tlenu wapniowego i dwutlenku węgla, w piecach zaś do wypalania gipsu przeprowadza się usuwanie wody krystalizacyjnej.

W piecach szklarskich zachodzi bardzo skomplikowany proces wytapiania szkła z różnego rodzaju surowców, z których najważniejsze są: czysty piasek, jako źródło krzemionki (SiO_2), siarczan sodowy (Na_2SO_4), wapień (CaCO_3), węglan potasowy (K_2CO_3), minia (Pb_3O_4) i stłuczki szklane. W piecu tym w miarę wzrostu temperatury zachodzi również suszenie surowców, rozkład wprowadzonych związków chemicznych, tworzenie się nowych, topienie i rozpuszczanie. W rezultacie otrzymuje się stopioną masę, która w strefie najwyższej temperatury pieca (ponad 1500°C), mieszając się, pozbywa się pęcherzyków powietrza (klaruje) i staje się jednorodną dość płynną masą szklaną.

W piecach do termicznej i termochemicznej obróbki stali wyroby stalowe są ogrzewane do właściwej temperatury i następnie utrzymywane w niej przez potrzebny okres czasu w celu zmiany ich struktury wewnętrznej lub nasycenia powierzchni metalu węglem w procesie cemen-

tacji, azotem w procesie azotowania, albo jednocześnie węglem i azotem w procesie cyjanizowania.

W piecach muflowych odpowiedniej konstrukcji prowadzi się procesy wymagające zabezpieczenia przed rozcieńczeniem gazowych produktów reakcji chemicznych zachodzących w piecu, a w piecach retortowych — proces rozkładowej destylacji węgla w celu otrzymania gazu świetlnego (miejskiego) i koksu.

W wielu piecach prowadzi się ogrzewanie materiałów do temperatury topnienia w celu ich roztopienia i następnie wylania do odpowiednich form dla otrzymania pożądanych odlewów.

Z powyższych, stosunkowo nielicznych przykładów wynika, że piece mają bardzo duże znaczenie. Stosuje się je nie tylko w przemysłach: ceramicznym, szklarskim, metalurgicznym, lecz również i w wielu innych gałęziach przemysłu chemicznego, np. w przemyśle gazowniczym, koksowniczym, nawozów sztucznych, kwasu siarkowego itp.

Ciepło potrzebne do przeprowadzania w piecach procesów technologicznych i otrzymywania w nich odpowiednio wysokich temperatur dostarcza zwykle proces spalania paliwa. W niektórych gałęziach przemysłu źródłem ciepła jest prąd elektryczny, jak np. w piecach do wytwarzania karbidu, tlenków azotu i w piecach do rafinowania stali. Poza tym są piece, w których uzyskuje się wysoką temperaturę na skutek zachodzących w nich reakcji chemicznych, głównie reakcji utleniania, np. w piecach do spalania siarki, wypalania pirytów i w gruszkach Bessemera i Thomasa.

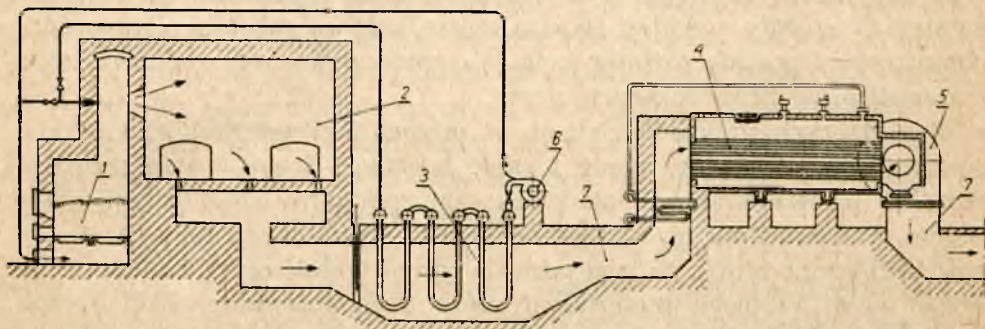
Najczęściej jednak głównym źródłem ciepła w większości pieców przemysłowych przy obecnym stanie techniki jest paliwo. W ogólnym bilansie paliwowym w Polsce zużycie paliwa w piecach przemysłowych zajmuje jedno z pierwszych miejsc. Oszczędne jego zużycie, konieczne ze względu na gospodarkę narodową oraz rentowność produkcji w przedsiębiorstwie przemysłowym, zależy w znacznym stopniu od prawidłowej konstrukcji pieca, dostosowanej do procesów technologicznych, dla których jest przeznaczony, oraz od umiejętnego wykorzystania w nim paliwa.

2. Ogólny schemat pieca

Nowoczesny piec przemysłowy jest urządzeniem bardzo skomplikowanym. Składa się on z szeregu części, z których każda jest przeznaczona do pełnienia odrębnej funkcji bardziej lub mniej ważnej dla prawidłowego działania pieca. Najważniejszymi częściami pieca przedstawionego schematycznie na rys. I-1 są: urządzenie paleniskowe 1, komora robocza 2, rekuperator 3, kocioł parowy 4 (lub inne urządzenie do wykorzystania ciepła odpadkowego gazów spalinowych), urządzenie do wywoływania ciągu 5, urządzenie do tłoczenia powietrza (do nadmuchu) 6, kanały piecowe 7 i urządzenia mechaniczne do obsługi pieca, a mianowicie urządzenie do jego załadowywania i wyładowywania, przesuwania w nim ogrzewanych

wyrobów i do innych celów. Poza tym w skład instalacji piecowej wchodzi przyrządy pomiarowe i kontrolne oraz czasami urządzenia do automatycznego kierowania pracą pieca.

W urządzeniu paleniskowym, zwanym powszechnie paleniskiem, zachodzi proces spalania paliwa, mający na celu przekształcenie energii chemicznej paliwa w energię cieplną gazów spalinowych, które następnie przekazują ją w komorze roboczej pieca przerabianym materiałom. Ponieważ w paleniskach spala się różnego rodzaju paliwa stałe (węgiel kamienny i brunatny, koks, torf i wyjątkowo drewno), ciekłe (mazut) i gazowe (gaz ziemny, generatorowy, koksowniczy i świetlny),



Rys. I-1. Schemat instalacji piecowej: 1 — palenisko, 2 — komora robocza, 3 — rekuperator, 4 — kocioł parowy, 5 — wentylator ssący, 6 — wentylator tłoczący powietrze, 7 — kanały dymowe

konstrukcja ich oczywiście jest dostosowana do rodzaju paliwa. Na dobór konstrukcji i wielkości paleniska wpływa również typ pieca, jego przeznaczenie i wielkość przerobu, czyli wydajność pieca.

W komorze roboczej pieca przeprowadza się zwykle proces technologiczny, dla którego piec jest przeznaczony (np. topienie wsadu w szklarskich i metalurgicznych piecach tyglowych, redukcja tlenków żelaza w wielkim piecu, wypalanie wyrobów porcelanowych kamionkowych i innych w odpowiednich piecach ceramicznych itd.). W komorze roboczej zachodzi wymiana ciepła pomiędzy gazami spalinowymi a przerabianymi w piecu materiałami. Przekazywanie ciepła w komorze roboczej pieca przez gazy spalinowe ogrzewanym materiałom powinno zachodzić w sposób najbardziej racjonalny i w ilości zapewniającej potrzebną wydajność pieca.

Kształt komory roboczej bywa różny. W zależności od przeznaczenia pieca może ona mieć kształt kanału o przekroju kołowym (rys. IX-1), tunelu (rys. VII-1), prostopadłościanu (rys. VI-1), wanny (rys. VIII-13), szybu (rys. V-3) itd. Wymiary jej zależą od wydajności pieca i warunków cieplnych jego pracy. Piece tunelowe np. są budowane o długości od kilku do stukilkudziesięciu metrów, długość spotykanych w przemyśle pieców obrotowych waha się w tych samych granicach. Piece szybowe posiadają

wysokość od kilku do 30 m, powierzchnia zaś trzona pieców do termicznej i termochemicznej obróbki wyrobów stalowych wynosi od 1 do 20 m², a do ogrzewania bloków stalowych w przemyśle metalowym do 60 m².

Ciepło, które tracą gazy spalinowe, obniżając swoją temperaturę w komorze roboczej, powinno się zużywać użytecznie na ogrzewanie przetwarzanych w piecu materiałów i podtrzymywanie reakcji endotermicznych zachodzących w czasie ogrzewania. W celu zmniejszenia strat ciepłych i zachowania temperatury gazów spalinowych w komorze roboczej pieca na wysokości optymalnej dla prawidłowego przebiegu procesu technologicznego komora robocza jest oddzielona od otoczenia obmurowaniem wykonanym od wewnątrz z odpowiedniej cegły ogniotrwałej, a na zewnątrz — z cegły zwykłej. Bardzo często komora robocza pieca oprócz obmurowania posiada również izolację cieplną wykonaną z odpowiednich materiałów źle przewodzących ciepło.

W niektórych przypadkach (np. w piecach wannowych) wewnętrzna powierzchnia pieca (sklepienie i część bocznych ścian) bierze pośredni udział w przekazywaniu ciepła przez gazy spalinowe ogrzewanym materiałom. Powierzchnia ta, rozżarzona gazami spalinowymi do najwyższej, możliwej temperatury, na jaką pozwala ogniotrwałość cegły, oddaje ciepło ogrzewanym w piecu materiałom przez promieniowanie. Taki sposób przekazywania ciepła ogrzewanym materiałom i wyrobom jest szczególnie pożądany w przypadku, gdy stopień czarności (emisyjność względna) gazów spalinowych jest mały.

Rekuperatory, regeneratory oraz kotły parowe są przeznaczone do użytecznego wykorzystywania ciepła zawartego w gazach spalinowych opuszczających komorę roboczą pieca. Temperatura tych gazów jest zwykle wysoka i w wielu przypadkach przekracza 1000°C, dochodząc w niektórych piecach powyżej 1500°C. Ciepło w nich zawarte wykorzystuje się w rekuperatorach i regeneratorach do podgrzewania powietrza potrzebnego do spalania oraz paliwa gazowego, jeżeli na takim właśnie paliwie piec pracuje.

Podgrzewanie powietrza i paliwa, jak wiadomo, podwyższa temperaturę spalania, a więc i temperaturę w komorze roboczej pieca. W wielu przypadkach osiągnięcie dla danego procesu technologicznego dostatecznie wysokiej temperatury w komorze roboczej nie byłoby możliwe bez odpowiedniego ogrzewania powietrza i paliwa gazowego. Na przykład wytapianie stali w piecach Siemens-Martina, wymagające temperatury strumienia palących się gazów w komorze roboczej (w wannie) ok. 1800—2000°C, nie byłoby możliwe bez podgrzewania powietrza i gazu palnego do temperatury ok. 1000—1200°C. Nie byłoby możliwe również w komorach roboczych wielu pieców przemysłowych przy ogrzewaniu ich małokalorycznym miejscowym paliwem (np. węglem brunatnym lub torfem) uzyskanie potrzebnej temperatury bez poprzedniego podgrzewania powietrza doprowadzanego do spalania.

Podgrzewanie paliwa gazowego i powietrza kosztem ciepła gazów odlotowych powiększa sprawność cieplną pieca, zmniejsza zużycie paliwa na jednostkę (na 1 tonę lub 1 sztukę) przerabianych materiałów, a więc wpływa dodatnio na ekonomiczność pracy pieca.

W niektórych przypadkach gazy spalinowe, opuszczające komorę roboczą, zawierają znacznie więcej ciepła niż potrzeba do ogrzewania powietrza i paliwa gazowego w rekuperatorach i regeneratorach, wskutek czego ich temperatura po wyjściu z rekuperatora (ewentualnie regeneratora) jest jeszcze zbyt wysoka, ażeby można było bez znacznych strat cieplnych odprowadzić je do komina. Ażeby wykorzystać zawarte w nich ciepło, ustawia się na ich drodze od rekuperatora lub regeneratora do komina kocioł parowy lub ekonomiser do podgrzewania wody, przez co temperatura spalin obniża się. Wytworzona para (lub gorąca woda) zużywana jest zwykle do celów technologicznych i grzejnych, np. w instalacjach centralnego ogrzewania. W ten sposób straty ciepła w odlotowych gazach spalinowych, tzw. straty kominowe, znacznie się obniżają, a sprawność i ekonomiczność całej instalacji wzrasta.

Urządzenia do podmuchu i wytwarzania ciągu są bardzo ważną częścią składową każdej instalacji piecowej i kotłowej. Wywołują one ruch powietrza i gazów spalinowych w instalacji i służą do ich usuwania poprzez komin do atmosfery.

Urządzenia do podmuchu (głównie wentylatory), wytwarzając nadciśnienie, dostarczają niezbędne do spalania powietrze pod ruszt paleniska lub do palników (gdy piec jest opalany pyłem węglowym, paliwem gazowym lub płynnym). Wywołują one również ruch gazów w części pieca przed jego komorą roboczą oraz w większości przypadków wewnątrz niej, ponieważ w komorze roboczej większości pieców utrzymuje się pewne niewielkie nadciśnienie.

Ruch gazów w dalszych częściach instalacji piecowej, od komory roboczej do komina, zachodzi na skutek działania urządzeń do wytwarzania ciągu: ekshaustorów (wentylatorów wyciągowych) lub inżektorów przy ciągu sztucznym i kominów przy ciągu naturalnym.

Urządzenia mechaniczne do obsługi pieca ułatwiają ładowanie namiaru (np. różnego rodzaju podnośniki przy piecach szybowych lub urządzenie do załadowywania metalurgicznych pieców Siemens-Martina) i wyładowywanie gotowych materiałów (np. urządzenia do ciągłego wyładowywania tlenku wapniowego CaO z pieców szybowych do wypalania wapna). Poza tym służą one do przesuwania przerabianych materiałów wewnątrz pieca (np. wyciągarki i popychacze w piecach tunelowych) oraz ułatwiają inne czynności przy jego obsłudze.

Urządzenia mechaniczne pieców znacznie zmniejszają wysiłek fizyczny robotników obsługujących piec, polepszają warunki ich pracy i umożliwiają zwiększenie wydajności pieca.

Przyrządy kontrolne i pomiarowe posiada każda należąca do pieców instalacja piecowa. W niektórych piecach zachodzą bardzo skomplikowane procesy technologiczne. Dla należytego kierowania nimi obsługa powinna w każdej chwili wiedzieć, jaka temperatura i ciśnienie panuje w różnych miejscach pieca, jaki jest skład chemiczny spalin, jak daleko posunęły się reakcje chemiczne i przemiany fizyczne w przerabianych w piecu materiałach itd. Informują o tym wskazania odpowiednich przyrządów pomiarowych i kontrolnych, które są zainstalowane w piecu. Poza tym nowoczesne instalacje piecowe posiadają urządzenia do automatycznego regulowania biegu pracy w poszczególnych częściach lub w całym urządzeniu pieca.

Ogólny schemat instalacji piecowej, przedstawionej na rys. I-1, może posiadać szereg wariantów. W niektórych przypadkach (np. w piecach kręgowych do wypalania cegieł, w piecach tunelowych lub w piecach szybowych do wypalania wapna) nie zachodzi potrzeba instalowania rekuperatorów lub regeneratorów, ponieważ ciepło zawarte w gazach spalinowych, opuszczających strefę ogniową pieca jest wykorzystywane do wstępnego ogrzewania i suszenia w nim surowych materiałów, wskutek czego temperatura gazów spalinowych opuszczających piec jest dostatecznie niska. Podgrzewanie powietrza zachodzi w tych przypadkach wewnątrz pieca kosztem ciepła zawartego w wypalonych materiałach, które przy tym są racjonalnie studzone.

Ciepło gazów spalinowych może być również wykorzystywane użytecznie i poza instalacją piecową, np. w urządzeniach suszarniczych. W tym przypadku zbędna staje się konieczność obniżania ich temperatury przez instalowanie kotłów parowych lub podgrzewaczy wody.

3. Technika spalania paliwa w piecach

Technika spalania paliwa w piecach przemysłowych różni się od techniki jego spalania w kotłach parowych. Różnica jest spowodowana tym, że proces technologiczny w wielu przypadkach wymaga utrzymywania w komorze roboczej pieca określonej atmosfery (utleniającej lub redukującej) oraz równomiernego rozkładu temperatur. Poza tym temperatura procesu parowania wody w kotle jest na ogół kilkakrotnie niższa od temperatur, w których przebiegają procesy technologiczne w piecach przemysłowych.

Temperatura parowania wody w kotłach parowych zależy, jak wiadomo, od ciśnienia, a że ciśnienie nawet w nowoczesnych kotłach wysokoprężnych nie przekracza 150 at, proces ten odbywa się w temperaturach niższych niż 340°C. Do przeprowadzenia parowania wody w kotle nadaje się każde, nawet najmniej kaloryczne paliwo, ponieważ zawsze w paleniu

sku kotłowym można uzyskać temperaturę znacznie wyższą od temperatury wrzenia wody w kotle nawet pod najwyższym ciśnieniem stosowanym w technice kotłowej i zapewnić doprowadzenie do kotła dostatecznej ilości ciepła. Pozwala to na spalanie pod kotłami dowolnych paliw nawet bez podgrzewania powietrza potrzebnego do spalania, jeżeli tylko paliwo jest dostosowane do rodzaju paleniska kotłowego.

Tablica I-1

NAJWYŻSZE TEMPERATURY W PIECACH

Typ pieca	Rodzaj procesu	Najwyższa temperatura materiału w °C
Wielki piec	wytapianie surówki	1600—1700
Piec Martina	topienie stali	1550—1650
Żeliwiak	topienie żeliwa	1300—1400
Piece do ogrzewania różnego rodzaju	zgrzewanie rur stalowych	1300—1350
	ogrzewanie bloków stalowych	1200—1250
	ogrzewanie stali przed kuciem	1150—1250
	obróbka termiczna i chemiczna stali	200—1100
Piece komorowe, kręgowo i tunelowe	wypalanie wyrobów dynasowych	1400—1500
	wypalanie wyrobów szamotowych	1200—1350
	wypalanie porcelany elektrotechnicznej	1350—1400
	wypalanie cegły budowlanej	800— 900
Piece obrotowe	wypalanie cementu	1430
Piece wannowe	wytapianie szkła	1400

Inaczej przedstawia się sprawa spalania paliwa w piecach. Procesy technologiczne przebiegają w piecach przemysłowych, jak wynika z tablicy I-1, na ogół w temperaturach wynoszących tysiąc kilkaset stopni Celsjusza. Ażeby w komorze roboczej pieca uzyskać tak wysokie temperatury, należy stosować inną niż w paleniskach kotłowych technikę spalania. Polega ona na:

1. odpowiednim przygotowaniu paliwa przed jego wprowadzeniem do paleniska,
2. prowadzeniu procesu spalania przy możliwie najniższym nadmiarze powietrza,
3. podgrzewaniu powietrza i paliwa do możliwie najwyższych temperatur,
4. dwustopniowym spalaniu paliw stałych.

Poddając paliwo wstępnej obróbce i prowadząc w odpowiedni sposób proces jego spalania, można uzyskać dostatecznie wysoką temperaturę w komorze roboczej pieca nawet przy spalaniu miejscowych małokalorycznych paliw (węgla brunatnego lub torfu). Oczywiście, uzyskanie w piecu wysokich temperatur przy spalaniu paliw o dużej wartości opałowej (koks i dobrych gatunków węgla kamiennego) wymaga mniej zabiegów niż w przypadku paliw małokalorycznych. Przy obecnym stanie

techniki cieplnej można z powodzeniem stosować do pieców przemysłowych paliwa gorszych gatunków.

Wstępna obróbka paliwa przed procesem spalania w piecach polega na jego suszeniu, mieleniu i zgazowaniu.

Suszeniu poddawane są paliwa, które bezpośrednio po wydobyciu zawierają dużo wilgoci (wilgotność np. świeżego węgla brunatnego dochodzi do 40%, drewna — do 55%, a torfu — nawet do 60%). Paliwa te są zwykle suszone na powietrzu (suszenie naturalne) do wilgotności 20—25%, wystarczającej przy spalaniu w paleniskach kotłowych. W przypadku spalania tego rodzaju paliw w piecach przemysłowych suszenie naturalne nie wystarcza. W celu powiększenia wartości opałowej paliw poddaje się je, gdy chodzi o uzyskanie w piecu wyższej temperatury, suszeniu sztucznemu w odpowiednich suszarkach. Potrzebne do tego ciepło dostarczają zwykle gazy spalinowe opuszczające piec, które po drodze do komina przepływają przez suszarkę. Suszarka paliwa zastępuje w tym przypadku na schemacie instalacji piecowej (rys. I-1) kocioł parowy.

Mielenie węgla kamiennego i brunatnego (wyjątkowo również koksu i torfu) na pył umożliwia spalanie tych paliw przy znacznie mniejszym nadmiarze powietrza niż spalanie ich w postaci kawałków lub ziarn (kostki, orzecha, groszku, grysiku i miału). Ponieważ proces spalania pyłu węglowego przebiega tym lepiej i wymaga tym mniejszego nadmiaru powietrza, im drobniej jest węgiel zmielony, wymiary cząstek pyłu węglowego nie powinny przekraczać 0,07 mm. Taki przemiał można osiągnąć wtedy, gdy paliwo przeznaczone do przeróbki na pył węglowy będzie poprzednio dobrze wysuszone.

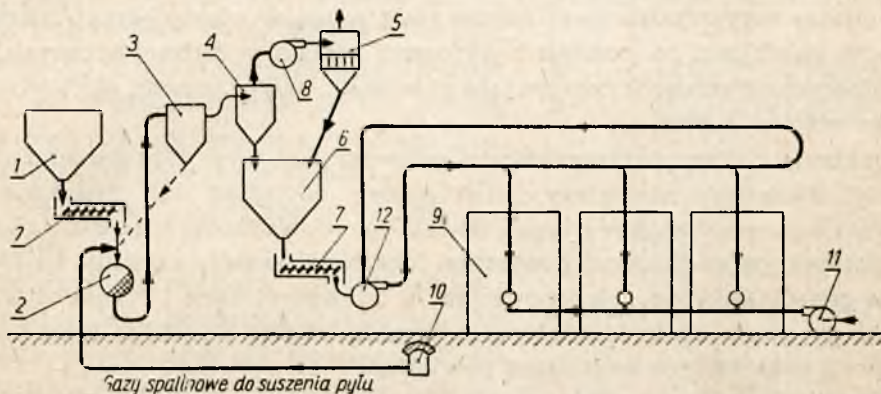
Mały nadmiar powietrza przy spalaniu pyłu węglowego daje możliwość otrzymania w palenisku i w komorze roboczej pieca wysokich temperatur, tym bardziej że wartość opałowa pyłu jest zwykle wyższa niż wartość opałowa paliwa, z którego on powstał, ponieważ jego wilgotność jest mniejsza. Wytwarzanie pyłu odbywa się zwykle bezpośrednio przed spalaniem, aby nie zdążył on, jako substancja higroskopijna, wchłonąć wilgoci z otoczenia.

Wytworzenie pyłu węglowego odbywa się dla każdego pieca oddzielnie w odpowiednich, indywidualnych urządzeniach mielących albo w urządzeniach centralnych, produkujących pył węglowy dla większej ilości pieców. Przy centralnym sposobie wytwarzania i zaopatrywania pieców w pył wielkość urządzenia do jego wytwarzania powinna być tak dobrana, aby mogła ona zapewnić zapas zmielonego paliwa na okres pracy jednej zmiany (na 8 godz). Utrzymywanie większego zapasu nie jest wskazane ze względu na higroskopijność pyłu i wchłanianie wilgotności z otoczenia, co nie jest pożądane.

Indywidualne urządzenia do wytwarzania pyłu węglowego spotyka się w zakładach przemysłowych, posiadających jeden lub najwyżej parę pie-

ców przystosowanych do opalania pyłem, centralne zaś — w zakładach, które posiadają większą liczbę mniejszych pieców na pył węglowy.

Na rys. I-2 przedstawiono schematycznie instalację do centralnego wytwarzania pyłu węglowego. Paliwo (rys. I-2) z zasobnika 1 dostaje się do młyna kulowego 2, gdzie jednocześnie odbywa się jego suszenie gazami spalinowymi o temp. 200—300°C i mielenie. Otrzymany pył jest unoszony z młyna przez gazy spalinowe i wraz z nimi pod działaniem ekschaustora 8 dostaje się do separatora 3, gdzie zostają oddzielone ziarna niedostatecznie zmielone, które kieruje się z powrotem do młyna, nato-



Rys. I-2. Schemat instalacji do centralnego wytwarzania pyłu węglowego: 1 — zasobnik, 2 — młyn kulowy, 3 — separator, 4 — cyklon, 5 — multicyklon, 6 — zasobnik pyłu, 7 — zasilacz, 8 — ekshaustor, 9 — piec, 10 — kanał dymowy, 11 — wentylator do wtórnego powietrza, 12 — wentylator cyrkulacyjny

miast pył po oddzieleniu się od spalin w cyklonie 4 multicyklonie 5 zbiera się w zasobniku 6. Zasilacz 7 podaje równomiernie gotowy pył węglowy do przenośnika pneumatycznego, którym jest on kierowany do poszczególnych pieców.

Ze względu na ekonomiczność mielenia bardzo ważne jest dobre odpylenie gazów wyrzucanych na zewnątrz przez urządzenia odpylające. Strata pyłu w tych gazach wynosi od 6 do 10%. Z tego powodu duże instalacje do wytwarzania pyłu węglowego zaopatruje się obecnie w dodatkowe odpylacze elektrostatyczne typu Cottrella, które znacznie lepiej odpylają gazy, sprowadzając stratę pyłu węglowego do 2—4%.

Z g a z o w a n i e p a l i w a zachodzi w specjalnych urządzeniach, zwanych generatorami, w których paliwo stałe przerabia się na paliwo gazowe — gaz generatorowy. Wytwarzanie gazu generatorowego, czyli gazyfikacja paliwa, może być centralne dla całego zakładu przemysłowego, grupowe dla kilku lub kilkunastu pieców i indywidualne dla jednego tylko pieca. W tym przypadku generator z piecem zwykle stanowi jedną całość.

Gazyfikacja centralna z wielu względów ma przewagę nad indywidualnym i grupowym wytwarzaniem gazu generatorowego. Daje ona możliwość lepszego zapewnienia bezpieczeństwa przed zatruciem personelu obsługującego generatory i stworzenia bardziej higienicznych warunków pracy niż rozrzucone po zakładzie przemysłowym generatory indywidualne. Poza tym sprawność centralnej stacji do wytwarzania gazu generatorowego jest większa, a liczba personelu obsługującego mniejsza niż przy stosowaniu gazyfikacji indywidualnej. Bardzo dużą zaletą gazyfikacji centralnej jest również możliwość poddania oczyszczaniu wytworzonego gazu generatorowego przed wprowadzeniem go do pieca.

Podczas oczyszczania gazu usuwa się z niego w odpowiedniej aparaturze (w zależności od potrzeb i wymagań procesów technologicznych zachodzących w piecach) następujące składniki: wilgoć, smołę, siarkowodór, kwas octowy i inne.

Opalanie pieców przemysłowych paliwem gazowym ułatwia utrzymywanie właściwej atmosfery (utleniającej, obojętnej lub redukującej) w komorze roboczej pieca oraz pozwala na prowadzenie procesu spalania z minimalnym nadmiarem powietrza. Możliwość silnego ogrzania zarówno gazu generatorowego, jak i powietrza w rekuperatorach i regeneracjach przed procesem spalania ułatwia uzyskanie bardzo wysokich temperatur w piecu przy małym nadmiarze powietrza.

Spalając w piecach suchy gaz generatorowy, otrzymany nawet z wilgotnych małokalorycznych paliw, jakimi są odpadki drzewne, torf i węgiel brunatny, przy stosowaniu odpowiednich, omówionych wyżej zabiegów można uzyskać w piecach temperatury gazów spalinowych dochodzących do 1700—1900°C.

Spalanie dwustopniowe paliwa stałego odbywa się w piecach zaopatrzonych w paleniska półgazowe. Warunki spalania paliw stałych w zwykłych paleniskach rusztowych wymagają, jak wiadomo, stosunkowo dużego nadmiaru powietrza i ograniczają możliwość wstępnego jego ogrzewania do stosunkowo niewysokich temperatur, ponieważ ogrzewanie powietrza do temperatur wyższych powoduje silne zanieczyszczenie rusztów roztopionym żużlem. Najwyższą temperaturę w tym przypadku uzyskuje się w palenisku, a nie w komorze roboczej pieca, jak tego najczęściej wymaga zachodzący w nim proces technologiczny.

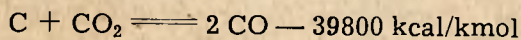
Przeniesienie najwyższej temperatury do komory roboczej pieca, czyli przeniesienie do niej ogniska spalania, umożliwiają paleniska z dwustopniowym spalaniem paliwa. Zasada tego spalania polega na tym, że we właściwym palenisku odbywa się proces niezupełnego spalania paliwa przy niedostatecznej dla jego całkowitego spalania ilości doprowadzonego powietrza. Otrzymany w ten sposób gaz półgeneratorowy dopala się następnie w komorze roboczej pieca. Powietrze wtórne, potrzebne do spalania tego gazu, można w tym przypadku ogrzewać do najwyższej

temperatury, możliwej do osiągnięcia w rekuperatorze lub regeneratorsze, a że spalanie gazu półgeneratorowego zachodzi przy stosunkowo małym nadmiarze powietrza, uzyskuje się w komorze roboczej pieca wysokie temperatury.

4. Paleniska półgazowe

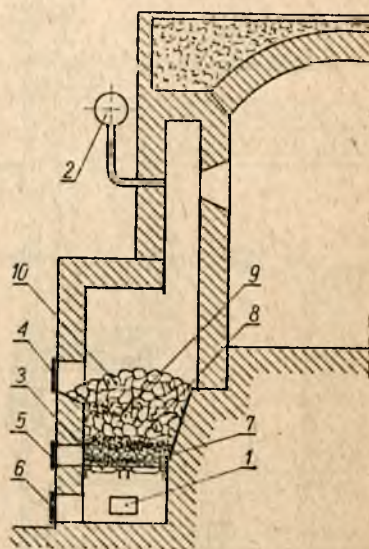
Schemat paleniska półgazowego do dwustopniowego spalania paliwa stałego jest przedstawiony na rys. 1-3. W paleniskach tego rodzaju warstwa paliwa jest znacznie grubsza niż w zwykłych paleniskach rusztowych, lecz cieńsza — niż w generatorach. Grubość jej w palenisku półgazowym przy pracy na węglu kamiennym lub koksie wynosi od 400 do 700 mm, podczas gdy w paleniskach zwykłych tylko — 100 do 200 mm, a w generatorach — 800 do 1600 mm.

Powietrze pierwotne w ilości 45 do 65% całkowitej ilości powietrza zużywanego do spalania doprowadza się do omawianego paleniska przewodem 1 pod odpowiednim ciśnieniem. Płyne ono przez ruszt 3 i — stykając się z rozżarzonego węglem w dolnej warstwie paliwa leżącego na ruszcie (w tzw. strefie spalania) — powoduje jego spalanie na dwutlenek węgla, którego część w górnych warstwach paliwa (w tzw. strefie redukcji 9) ulega redukcji na tlenek węgla zgodnie z reakcją



Jest to reakcja endotermiczna, powodująca obniżenie temperatury powstających gazów, które oprócz CO_2 zawierają dość znaczną ilość CO . Gazy te, będąc produktem niezupełnego spalania, czyli częściowej gazyfikacji paliwa są palne i noszą nazwę gazu półgeneratorowego.

Temperatura gazów w palenisku półgazowym pracującym na węglu kamiennym i koksie dochodzi zwykle do ok. $1000^\circ C$, gdy w generatorach, w których zawartość CO w gazach jest znacznie większa, wynosi tylko $500-600^\circ C$. W związku z gazyfikacją mało posuniętą w palenisku półgazowym wartość opałowa gazu półgeneratorowego jest niska. Wynosi

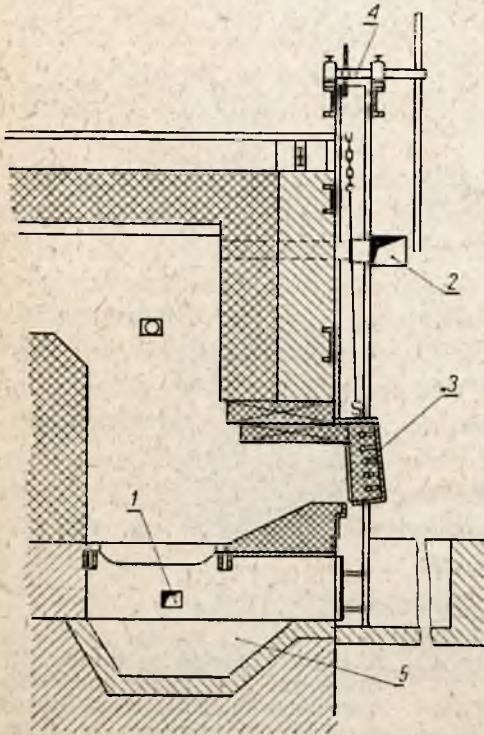


Rys. 1-3. Schemat paleniska półgazowego: 1 — kanał do powietrza pierwotnego, 2 — przewód do powietrza wtórnego, 3 — ruszt, 4, 5 — drzwiczki paleniskowe, 6 — drzwiczki popielnikowe, 7 — żużel, 8 — strefa spalania, 9 — strefa redukcji, 10 — warstwa świeżego paliwa

ona zwykle od 600 do 900 kcal/Nm³, gdy wartość opałowa gazu generatorowego waha się w granicach od 1000 do 1300 kcal/Nm³.

Wytworzony w palenisku gaz półgeneratorowy kieruje się (rys. I-3) do komory roboczej pieca, która spełnia w tym przypadku rolę komory spalania. Potrzebne do spalania tego gazu powietrze wtórne, ogrzane do odpowiedniej temperatury, jest doprowadzane przewodem 2 w ilości od 35 do 45% powietrza zużywanego w omawianej instalacji do zupełnego spalania paliwa stałego. Przed wejściem do komory roboczej miesza się ono

z gazem półgeneratorowym, który w zetknięciu z powietrzem od razu się zapala, dalszy zaś proces spalania przebiega w komorze roboczej pieca.



Rys. I-4. Palenisko półgazowe do węgla kamiennego i koksu: 1 — kanał do powietrza pierwotnego, 2 — dysze do powietrza wtórnego, 3 — drzwiczki paleniskowe, 4 — mechanizm do podnoszenia drzwiczek, 5 — zbiornik do wody

Inne palenisko półgazowe, również do węgla kamiennego i koksu, jest przedstawione na rys. I-4. W tym przypadku powietrze wtórne jest doprowadzane poprzez kilka dysz 2 z dużą prędkością (od 20 do 30 m/sek). Wywołuje to wiry przy wejściu do komory roboczej, co zapewnia dobre wymieszanie powietrza z gazem palnym.

Jakość mieszania powietrza wtórnego z paliwem gazowym ma duży wpływ na przebieg spalania. Intensywne mieszanie skraca czas trwania procesu spalania gazu i pozwala stosować mały nadmiar powietrza. Na przykład w paleniskach półgazowych dobre mieszanie umożliwia spalanie gazu półgeneratorowego ze współczynnikiem nadmiaru powietrza λ wynoszącym od 1,05 do 1,15.

Sklepienie i boczne ściany palenisk półgazowych obmurowuje się wewnątrz cegłą ogniotrwałą, co przedłuża czas ich pracy bez remontu.

Obsługa paleniska półgazowego, przedstawionego na rys. I-4, nie jest uciążliwa, szczególnie gdy jest ono zaopatrzone w mechanizm do podnoszenia drzwiczek. Palacz powinien tylko utrzymywać w palenisku określoną grubość warstwy paliwa, oczyszczać ruszt z żużla i usuwać żużel z popielnika.

Wolna, nie wypełniona paliwem przestrzeń w paleniskach półgazowych spełnia rolę zbiornika gazu palnego. Jej kształt wyznaczają względy konstrukcyjne, objętość zaś można obliczyć ze wzoru

$$V_1 = \frac{B (W - v_g \cdot W_g)}{q} \text{ m}^3 \quad [I-1]$$

gdzie: B — ilość paliwa spalanego w palenisku w kg/godz,

W — wartość opałowa paliwa w kcal/kg,

W_g — wartość opałowa gazu półgeneratorowego w kcal/Nm³, wynosząca od 600 do 900 kcal/Nm³,

v_g — wydajność gazu z 1 kg paliwa w Nm³/kG, wynosząca przy węglu kamiennym i koksie od 3 do 3,5 Nm³/kG,

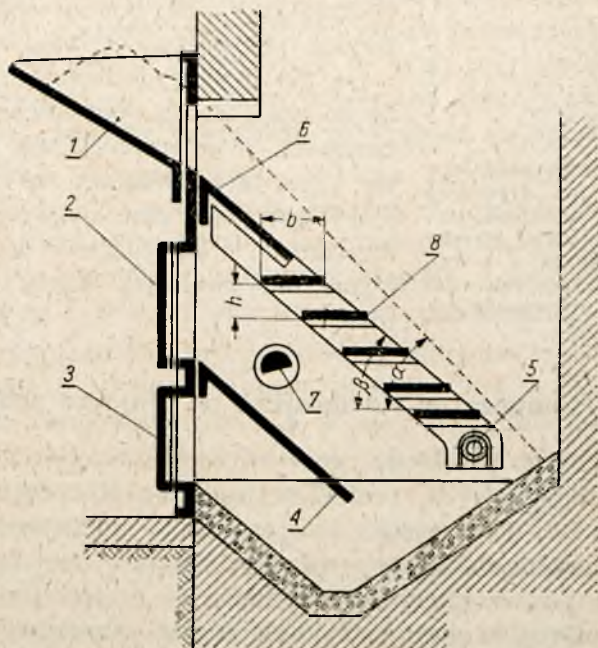
q — dopuszczalne obciążenie (natężenie) cieplne komory paleniskowej wynoszące dla węgla kamiennego i koksu od 200 000 do 300 000 kcal/m³ godz, w kcal/m³.

Objętość paliwa leżącego na rusztach wynosi

$$V_2 = \frac{B \cdot \tau}{\gamma} \text{ m}^3$$

gdzie: τ — czas przebywania paliwa w palenisku, wynoszący dla węgla kamiennego i koksu, od 3 do 4 godz,

γ — ciężar objętościowy paliwa w kg/m³.



Rys. I-5. Palenisko półgazowe z rusztem schodkowym: 1 — kosz załadowniczy, 2 — drzwiczki do oczyszczania rusztu, 3 — drzwiczki do usuwania żużla, 4 — fartych, 5 — belka oporowa, 6 — próg, 7 — doprowadzenie powietrza pierwotnego, 8 — rusztowina

Całkowita objętość komory paleniskowej V wobec tego wynosi

$$V = V_1 + V_2 \text{ m}^3$$

a jej wysokość

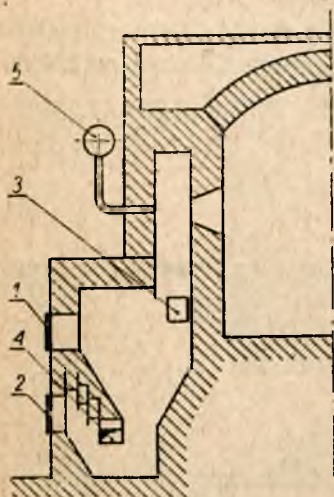
$$h = \frac{V}{F} = \frac{V_1}{F} + \frac{V_2}{F} \text{ m} \quad [I-2]$$

gdzie F jest powierzchnią rusztów w m^2 .

Oprócz palenisk półgazowych z rusztem płaskim dość często są stosowane paleniska z rusztem schodkowym, szczególnie do węgla gorszych gatunków. Jedno z takich palenisk przedstawione jest na rys. I-5. Kąt nachylenia rusztu schodkowego w paleniskach półgazowych, podobnie jak w paleniskach zwykłych, jest zbliżony do naturalnego kąta zsypania paliwa. Grubość warstwy paliwa leżącego na ruszcie schodkowym mało różni się od grubości warstwy paliwa znajdującego się na ruszcie poziomym.

Gruba warstwa paliwa na ruszcie stawia w paleniskach półgazowych duży opór przepływającym przez nią gazom. Wymaga to doprowadzenia pod ruszt pierwotnego powietrza pod dość dużym ciśnieniem, które zwykle jest wyższe od 50 mm sł. H_2O .

Na rys. I-6 przedstawiono bardzo dogodne do eksploatacji półgazowe palenisko bezrusztowe. W paleniskach tego typu spalająca się warstwa paliwa leży na warstwie żużla, który okresowo jest usuwany przez dolne drzwiczki. Brak rusztów ułatwia obsługę i znacznie zmniejsza koszty remontu paleniska.



Rys. I-6. Półgazowe palenisko bezrusztowe: 1 — drzwiczki paleniskowe, 2 — drzwiczki popielnikowe, 3 — kanał do odprowadzania półgazu, 4 — kanał do powietrza pierwotnego, 5 — przewód do powietrza wtórnego

5. Rozkład temperatur i atmosfera w komorze roboczej pieca

Dla prawidłowego przebiegu procesów technologicznych, zachodzących w piecach przemysłowych, potrzebna jest nie tylko odpowiednia i jak widać w tabl. I-I, dość wysoka temperatura w komorze roboczej pieca, lecz często specjalne dodatkowe warunki. Dotyczą one stałości temperatury w czasie i równomierności rozkładu jej w przestrzeni oraz odpowiedniej atmosfery w piecu lub konieczności chronienia przerabianych w nim materiałów od chemicznego działania gazów spalinowych.

Stażność temperatury w czasie osiąga się w piecach przemysłowych stosunkowo łatwo z dostateczną dokładnością do celów tech-

nicznych, jeżeli piec pracuje na paliwie gazowym pod warunkiem, że ciśnienie i skład paliwa (czyli jego wartość opałowa) oraz ilość doprowadzanego powietrza z biegiem czasu nie ulegają zmianie. Stałą temperaturę w czasie można również osiągnąć w piecach opalanych paliwem ciekłym i pyłem węglowym, natomiast nie udaje się jej utrzymywać w komorze roboczej pieca na stałym, niezależnym od czasu poziomie przy spalaniu paliwa stałego nawet w paleniskach półgazowych.

Równomierny rozkład temperatur w komorze roboczej jest bardzo często warunkiem prawidłowego przebiegu procesu technologicznego w piecu. Przy nierównomiernym na przykład rozkładzie temperatur w piecach do wypalania wyrobów ceramicznych pewna ich część bywa niedopalona, inna przepalona, co jest główną przyczyną otrzymania dużej ilości braków oraz wyrobów gorszych gatunków (gat. III i IV). Nierównomierność rozkładu temperatur w przestrzeni w niektórych piecach (np. w piecach komorowych do wypalania wyrobów porcelanowych, fajansowych, karborundowych, dynasowych i szamotowych lub w niektórych piecach do termicznej obróbki metali) nie powinna przekraczać $\pm 20^{\circ}\text{C}$.

Ażeby osiągnąć możliwie równomierny rozkład temperatur w komorze roboczej pieca, palące się gazy (czyli płomień) powinny ją wypełniać całkowicie i równomiernie. Nie jest dopuszczalne, aby przez jedną część komory roboczej przepływał strumień gazów palących się płomieniem, a przez drugą — niewidoczny strumień gazów przezroczystych z zakończonym procesem spalania, ponieważ w tym przypadku wyroby lub materiały znajdujące się w różnych miejscach komory roboczej byłyby w różniących się znacznie warunkach ze względu na ogrzewanie.

Dla osiągnięcia równomiernego rozkładu temperatur umieszcza się w komorze roboczej pieca w przypadku dużych jej wymiarów nie jeden, lecz więcej palników, albo prowadzi się proces spalania paliwa przy silnie wyciągniętym płomieniu. Można to osiągnąć przez regulowanie procesu mieszania się powietrza wtórnego z palnymi gazami.

Przy ogrzewaniu dużych przedmiotów w komorze roboczej pieca (np. przy termicznej i termochemicznej obróbce) dla osiągnięcia równomierności ogrzewania umieszcza się w niej kilka lub więcej palników o niewielkiej stosunkowo wydajności i kieruje się ich płomień w taki sposób, aby temperatura w każdym miejscu komory roboczej była możliwie jednakowa.

Bardzo często proces technologiczny wymaga utrzymywania w komorze roboczej pieca atmosfery o określonych właściwościach chemicznych, a mianowicie o właściwościach utleniających, redukujących lub atmosferę obojętną.

Atmosfera utleniająca powstaje przy całkowitym spalaniu paliwa z takim nadmiarem powietrza, że gazy spalinowe zawierają mini-

malne ilości (lub tylko ślad) tlenu węgla i stosunkowo dużo wolnego tlenu.

Atmosferę redukującą uzyskuje się zwykle przy całkowitym spalaniu paliwa z niedostateczną ilością powietrza, wskutek czego gazy spalinowe zawierają znaczną ilość tlenu węgla. Uzyskanie więc atmosfery redukującej jest połączone ze stratami cieplnymi wskutek niepełnego spalania węgla.

Atmosfera obojętna powstaje przy całkowitym spalaniu paliwa bez nadmiaru powietrza, tak że gazy spalinowe teoretycznie nie zawierają ani tlenu węgla, ani tlenu. Atmosferę powyższą najłatwiej można uzyskać przy spalaniu paliwa gazowego.

Atmosferę utleniającą lub redukującą w komorze roboczej pieca stosuje się w takich przypadkach, gdy proces technologiczny wymaga odpowiedniego chemicznego oddziaływania gazów spalinowych na znajdujące się w niej wyroby i materiały. Na przykład przy wypalaniu porcelany w piecach przeznaczonych do tego celu w różnych okresach czasu odpowiednio do przebiegu procesu wypalania utrzymuje się atmosfery: utleniającą, redukującą i obojętną. W niektórych piecach do termicznej obróbki metali utrzymuje się atmosferę obojętną lub nieco redukującą, aby zapobiec odwęglaniu powierzchni przedmiotów obrabianych w piecu.

Jeżeli zachodzi konieczność zabezpieczenia ogrzewanych w piecu wyrobów od chemicznego działania gazów spalinowych, wypełnia się komorę roboczą pieca odpowiednim gazem ochronnym (np. w niektórych przypadkach w piecach do termicznej obróbki stali) lub umieszcza się ogrzewane przedmioty w muflach albo kapslach (np. przy wypalaniu przedmiotów porcelanowych). W tych przypadkach przekazywanie ciepła gazów spalinowych ogrzewanym przedmiotom odbywa się przez promieniowanie rur żarowych, ścianek mufl i kapsli rozżarzonych przez gazy spalinowe.

RUCH GAZÓW W PIECACH

1. Wstęp

Gazy powstające w palenisku w wyniku spalania paliwa dostają się do komory roboczej pieca, w której w zależności od potrzeb procesu technologicznego przebywają krótszy lub dłuższy okres czasu, przekazując za-
warte w nich ciepło materiałom i wyrobom ogrzewanym w piecu, po-
czym — dążąc do komina — przepływają przez różnego rodzaju wymieni-
niki ciepła. Ażeby praca instalacji piecowej przebiegała dobrze, ruch
gazów w niej powinien być taki, aby zapewniał doprowadzenie do insta-
lacji, przepływ przez nią i odprowadzanie niezbędnej ilości gazów spali-
nowych oraz właściwy rozkład temperatur i ciśnień w piecu.

Właściwy ruch gazów w przestrzeni roboczej pieca oraz w jego kana-
łach i urządzeniach pomocniczych wykorzystujących ciepło gorących
gazów odlotowych (regeneratory, rekuperatory, kotły parowe i inne) jest
jednym z ważniejszych warunków prawidłowej pod względem technicz-
nym i oszczędnej pod względem ekonomicznym pracy pieca.

Ruch gazów w piecach może być naturalny lub wymuszony (sztuczny).

Naturalny ruch gazów w piecach zachodzi pod wpływem różnicy cię-
żarów właściwych gazów w różnych miejscach instalacji, a więc zwykle
w piecach posiadających swobodne przestrzenie o znacznych objętościach
i stosunkowo dużych różnicach temperatur w różnych ich punktach. Cha-
rakterystyczną cechą tego ruchu jest mała jego prędkość.

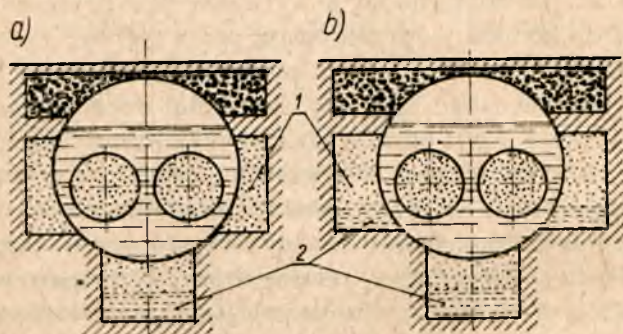
Zachodzi on w piecach samorzutnie bez oddziaływania zewnętrznego.
Temperatura gazów stykających się z silnie ogrzаныmi ścianami wzrasta,
a wskutek zetknięcia się z zimniejszym wsadem pieca lub z zimniejszymi
ścianami zmniejsza się. Zmiana temperatur pociąga za sobą zmianę cię-
żarów właściwych gazów, co powoduje różnicę ciśnień statycznych w róż-
nych miejscach instalacji piecowej, wywołującą w rezultacie naturalny
ruch gazów.

Ruch wymuszony powstaje pod działaniem bodźców zewnętrznych, po-
wodujących różnicę ciśnień na początku (przed paleniskiem) i w końcu
(u wylotu komina) instalacji piecowej. Przyczynami wywołującymi ruch
wymuszony może być również energia kinetyczna strumienia gazów wy-

chodzących z palników i inżektorów oraz spadek ciśnienia w komorze roboczej. W tym przypadku ruch gazów zależy od ich prędkości początkowej i od oporów przepływu.

Należy zaznaczyć, że ruch gazów w większości instalacji piecowych zachodzi na skutek jednoczesnego działania zarówno sił naturalnych powstających wewnątrz pieca, jak i sił zewnętrznych. Ruch gazów, wywołany wyłącznie przyczynami naturalnymi, jak również ruch wyłącznie wymuszony spotyka się w piecach rzadko.

Teoria ruchu naturalnego gazów w piecach była opracowana kilkadziesiąt lat temu przez profesora Politechniki Petersburskiej W. E. Grum-Grzymajłę przy współudziale profesora hydrauliki Józefa Jeśmana, a następnie była rozwijana i uzupełniana przez ich uczniów. W Polsce naturalnym ruchem gazów w piecach i aparatach przemysłu chemicznego zajmował się prof. Czesław Grabowski, który w latach 1929—1932 ogłosił na powyższy temat w „Technice Ciepłej” szereg prac pod ogólnym tytułem „Zasady hydraulicznej teorii ciągu” oraz w 1939 r. w „Przemysle



Rys. II-1. Schemat ruchu gazów w kotle płomieniowym: 1 — gazy gorące, 2 — gazy zimne

Chemicznym” — pracę pt. „Nowa teoria pionowych prądów gazów i cieczy w aparatach przemysłu chemicznego”.

Prof. W. E. Grum-Grzymajło, obserwując i badając przed pierwszą wojną światową działanie wielu instalacji piecowych, przyszedł do przekonania, że ruch gorących gazów w piecach podlega tym samym w zasadzie prawom mechaniki płynów co ruch cieczy.

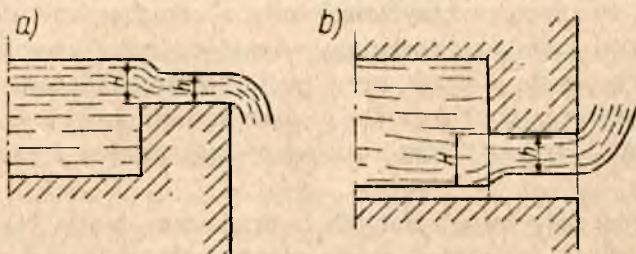
Gorące gazy spalinowe według jego obserwacji dążą do góry zupełnie tak samo jak ciecz spada na dół. Podobnie jak woda w rzece zapełnia wszystkie nierówności swego koryta i oddziela się od atmosfery swoją górną swobodną powierzchnią, płynąc w kierunku spadku, tak i gorące gazy spalinowe wypełniają wszystkie nierówności sklepienia pieca i gdy płyną w kierunku komina zbyt dużymi kanałami, których nie wypełniają całkowicie, oddzielają się dolną, płaską swoją powierzchnią od gazów zimniejszych, teoretycznie nieruchomych, znajdujących się na dnie tych kanałów (rys. II-1). A zatem prąd gorących gazów spalinowych w pozio-

mych kanałach pieca zgodnie z poglądem Grum-Grzymajły jest rzeką, której łożyskiem jest sklepienie pieca.

Dla łatwiejszego zrozumienia naturalnego ruchu gorących gazów w jakimś piecu rysunek tego pieca należy odwrócić fundamentami do góry, a sklepieniem — w dół i wyobrazić sobie, że z paleniska zamiast gorących gazów płynie do pieca woda, wtedy przewidywane w wyobraźni zachowanie się jej w piecu, wysokość wypełnienia pieca i charakter ruchu wody będą odpowiadać zachowywaniu się, zapełnieniu i charakterowi ruchu gorących gazów spalinowych w tym piecu.

Gdy woda, płynąc kanałem, spotyka na swej drodze przegrodę, powstaje, jak wiadomo, przelew (rys. II-2a). Podobny, lecz odwrócony przelew gazowy (rys. II-2b) powstaje również w przypadku przepływu gorących gazów spalinowych przez odpowiednie przeszkody na ich drodze oraz przy wypływie ich przez otwarte drzwiczki i inne otwory w piecu (rys. II-2b).

Opierając się na prawach hydromechaniki, prof. W. E. Grum-Grzymajło stworzył tzw. hydrauliczną teorię ciągu, przy pomocy której można było



Rys. II-2. Przelewy a) wodny, b) gazowy

nie tylko wyjaśnić przyczyny niezadowalającego działania wielu istniejących wówczas pieców i uzyskać wskazówki, jak należy je przebudować, lecz również projektować i obliczać nowe prawidłowo działające instalacje piecowe z naturalnym ruchem gazów, wywołanym ciągiem kominowym.

W oparciu o powyższą teorię zaprojektowano i wybudowano w latach międzywojennych w różnych krajach liczne instalacje piecowe z naturalnym ruchem gazów. Posiadały one jednak stosunkowo niewielkie wskaźniki techniczne i ekonomiczne w porównaniu z osiąganymi obecnie w nowoczesnych piecach pracujących przy wymuszonym ruchu gazów.

Naturalny ruch gazów, jak już było poprzednio zaznaczone, posiada stosunkowo małe prędkości, ponieważ różnica ciężarów właściwych gorących gazów, znajdujących się w instalacji piecowej (łącznie z kominem), i zimnego powietrza otaczającego instalację nie jest duża.

Mała prędkość gazów w piecu pociąga za sobą konieczność budowy pieców posiadających duże kanały dymowe. Wpływa to na powiększenie kosztów inwestycyjnych, a poza tym znacznie pogarsza wymianę ciepła

między gazami a ogrzewanymi w piecu materiałami i wyrobami, co bardzo zmniejsza wydajność instalacji piecowej.

Rozwój techniki budowy i eksploatacji pieców wymaga obecnie zapewnienia możliwości uzyskania w instalacjach piecowych najbardziej wysokich wskaźników technicznych oraz możliwie największej wydajności. Wymagania te powodują konieczność wykorzystania wszystkich środków technicznych do powiększania prędkości ruchu gazów w piecach.

Przy dużych prędkościach gazów główną przyczyną ich ruchu w instalacji piecowej jest ciśnienie lub próżnia, wytwarzane za pomocą wentylatorów, ekshaustorów lub iniekatorów. Ruch więc gazów w nowoczesnych instalacjach jest ruchem wymuszonym. Różnica ciśnień, wywołana naturalną różnicą ciężarów właściwych w różnych miejscach instalacji, w nowoczesnych piecach ma małe znaczenie i często w obliczeniach technicznych nie jest brana pod uwagę.

Przy wymuszonym ruchu gazów wiele zjawisk w piecu, związanych z ruchem, przebiega w sposób tak skomplikowany, że nie można ich ani przewidzieć, ani wyjaśnić tylko na podstawie praw hydromechaniki, tym bardziej że piece przemysłowe wraz z urządzeniami pomocniczymi i dość zawiłymi kanałami posiadają w całości kształt bardzo złożonych brył geometrycznych. Jednak przy projektowaniu pieców należy mieć dość dokładny obraz ruchu gazów w komorze roboczej i w innych częściach instalacji piecowej oraz rozkład w niej ciśnień i prędkości przepływu gazów.

Dla ustalenia powyższych danych hydrauliczna teoria ciągu nie może mieć zastosowania, natomiast duże usługi oddają teoria podobieństwa i oparta na niej teoria modelowania.

Teorie podobieństwa i modelowania były opracowane przed trzydziestu laty i od tego czasu coraz częściej są stosowane w różnych gałęziach wiedzy technicznej, między innymi również i w nauce o piecach. Powyższe teorie zostały dość szczegółowo omówione przez prof. Stanisława Bretsznajdera ¹⁾, toteż w niniejszej pracy zostaną podane tylko bardzo krótkie wiadomości o modelowaniu procesów przebiegających w piecach przemysłowych.

Modelowaniem pewnego procesu nazywamy odtwarzanie procesu podobnego do procesu wzorcowego.

Aby proces w modelu był podobny do procesu we wzorcu, należy zachować zgodnie z teorią modelowania następujące warunki:

1. powinno być zachowane podobieństwo geometryczne modelu do wzorca,
2. powinny być identyczne równania bezwymiarowe, opisujące zjawiska w modelu i we wzorcu, a więc wielkości fizyczne charakteryzujące

¹⁾ S. Bretsznajder: Zagadnienia projektowania procesów przemysłu chemicznego. PWT. Warszawa 1956.

modelowany proces powinny zmieniać się w modelu według tych samych praw, jak zmieniają się one we wzorcu,

3. wielkości fizyczne, określające stan początkowy i końcowy (warunki brzegowe) wzorca i modelu, powinny być proporcjonalne, czyli wielkości powyższe podane w postaci bezwymiarowej muszą być identyczne zarówno dla wzorca, jak i dla modelu,

4. podstawowe kryteria podobieństwa dla wzorca i dla modelu powinny być jednakowe.

Jeżeli wszystkie cztery powyższe warunki są zachowane, model jest podobny do wzorca. Wówczas we wszystkich odpowiadających sobie miejscach wzorca i modelu wszystkie kryteria są odpowiednio sobie równe, a wszystkie wielkości fizyczne charakteryzujące proces będą odpowiednio proporcjonalne.

Przystosowanie teorii modelowania do potrzeb nauki o piecach dało możliwość badania ruchu gazów w piecu na modelach odtwarzających instalację piecową w odpowiednio małej skali. Umożliwiło to poznawanie zjawisk w piecu z takimi szczegółami, których w wielu przypadkach nie można było uzyskać przy badaniu oryginalnej instalacji.

Przy projektowaniu pieca przemysłowego o skomplikowanym kształcie zachodzi konieczność ustalenia szeregu ważnych czynników, od których zależy prawidłowe wykonanie tego projektu, między innymi trzeba np. wiedzieć, czy gazy będą przepływały równomiernie przez cały przekrój komory roboczej pieca, w której odbywa się ogrzewanie materiałów i wyrobów, oraz jak wielkie opory hydrauliczne będzie stawiała projektowana instalacja. Zagadnień powyższych nie można rozwiązać przy pomocy obliczeń teoretycznych, wobec czego w celu uzyskania odpowiednich danych przeprowadza się badania przepływu gazów i mierzy się opory w modelu zbudowanym zgodnie z wymaganiami teorii modelowania.

Model pieca, wykonany w skali wielokrotnie mniejszej od skali wzorca (projektowanej instalacji piecowej), należy zbudować z przezroczystego materiału, np. ze szkła, celuloиду itp., aby można było obserwować kierunek przepływu gazów i stwierdzić, czy tworzą się i w których miejscach badanej instalacji wiry i martwe przestrzenie bez przepływu. W modelu można również zmierzyć opory przepływu gazów, a otrzymane wyniki przeliczyć w odniesieniu do wzorca i w ten sposób ustalić opory badanej instalacji.

Bardzo dużą zaletą metody modelowania jest możliwość obserwowania przepływu płynów w modelu badanej instalacji i przeprowadzenia w ten sposób jakościowej oceny zachodzących w niej zjawisk. W tym celu jako płyn przepuszczany przez model stosuje się najczęściej wodę, do której wprowadza się cienkie strumienie kolorowej cieczy lub drobne, zawieszono-
ne cząstki ciał stałych. Przez model można również kierować gazy z do-

datkiem amoniaku, powlekając uprzednio niektóre wewnętrzne powierzchnie modelu kwasem solnym w celu wytworzenia dymów (w reakcji chlorowodoru z amoniakiem powstają dymy chlorku amonowego).

Obserwując przepływ odpowiednich płynów w przezroczystym modelu można stwierdzić, w którym miejscu badanej instalacji tworzą się wiry zwiększające opory przepływu, ustalić obszary przepływu laminarnego i burzliwego oraz wielkość i obszar zwięzienia strumienia wskutek zmian kierunku przepływu itp. Takie obserwacje mogą mieć duże znaczenie przy ustalaniu kształtu i wymiarów projektowanej instalacji piecowej.

M. A. Michejew¹⁾ podaje dwa przykłady badania przepływu gazów na modelach z przezroczystymi ścianami. W pierwszym opisał badanie podgrzewacza, które wykazało miejsca powstawania wirów w przepływających gazach. Na podstawie tych badań przeprowadzono niewielkie zmiany konstrukcyjne, dzięki czemu udało się usunąć wiry, a przez to zmniejszyć opory podgrzewacza prawie trzykrotnie i znacznie poprawić jego pracę.

W drugim przykładzie opisuje on badanie metodą modelowania kotła wodnorurkowego systemu Garbe, o powierzchni ogrzewalnej 1200 m², i stwierdza całkowitą zgodność wyników badań na modelu z wynikami pomiarów bezpośrednio na wzorcu, czyli na powyższym kotle w czasie jego pracy.

2. Podstawy teoretyczne ruchu gazów

Ruch płynów we wszelkiego rodzaju kanałach i przewodach gazowych podlega równaniu Daniela Bernoulliego w postaci różniczkowej

$$\frac{dp}{\gamma} + d \frac{w^2}{2g} + dh + dZ = 0 \quad [\text{II-1}]$$

gdzie: w — prędkość w m/sek,

g — przyspieszenie ziemskie w $\frac{\text{m}}{\text{sek}^2}$,

p — ciśnienie w kG/m²,

γ — ciężar właściwy w kG/m³,

h — wysokość w m,

Z — straty wysokości w m.

Równanie powyższe dla wcdy, która jest praktycznie nieściśliwą, można łatwo scałkować, gdy przepływ jest izotermiczny, ponieważ w tym przypadku $\gamma = \text{const}$. Natomiast ciężar właściwy gazów zmienia się nie tylko wraz z temperaturą, lecz również i ze zmianą ciśnienia, jak to wynika z równania Clapeyrona

$$pv = RT$$

¹⁾ M. A. Michejew: Zasady wymiany ciepła. PWN. Warszawa 1953.

gdzie: v — objętość właściwa gazów w m^3/kG ,
 T — temperatura bezwzględna w $^\circ\text{K}$,
 R — stała gazowa w $\text{m}^3/^\circ\text{K}^1$.

Wielkość R zależy od składu gazów. Dla gazów spalinowych średnia wartość stałej gazowej wynosi ok. $28,68 \text{ m}^3/^\circ\text{K}$.

Gazy, przepływając przez piec, znajdują się zwykle pod ciśnieniem, które mało się różni od ciśnienia atmosferycznego (10333 kG/m^2 lub $\text{mm H}_2\text{O}$). Różnica ta w różnych miejscach pieca wynosi zwykle od kilku do kilkunastu $\text{mm H}_2\text{O}$, co stanowi od $0,02$ do $0,2\%$ ciśnienia atmosferycznego. Zmiana objętości, a więc i ciężaru właściwego gazów pod wpływem tak niewielkich zmian ciśnienia jest bardzo mała i dlatego nie bierze się jej zwykle pod uwagę. Ciśnienie więc w instalacji piecowej nie ma praktycznie wpływu na ciężar właściwy gazów.

W całym piecu zarówno w jego komorze roboczej, jak i w kanałach dymowych oraz w urządzeniach wykorzystujących ciepło spalin odlotowych zachodzi znaczna zmiana temperatury gazów przepływających przez piec, co automatycznie pociąga za sobą zmianę ich objętości zgodnie z równaniem Clapeyrona.

Biorąc pod uwagę, że $\gamma = \frac{1}{v}$, z równania Clapeyrona z dostateczną dokładnością do celów technicznych otrzymamy, że dla gazów spalinowych w instalacji piecowej

$$\gamma = \frac{p}{RT} = \frac{10333}{28,68} \cdot \frac{1}{T} = 360 \frac{1}{T} \text{ kG/m}^3 \quad [\text{II-2}]$$

Zmiana temperatury gazów w piecu i w jego kanałach na ogół zachodzi stopniowo, wskutek czego można przyjąć, że na dostatecznie krótkich odcinkach ich drogi zmiana objętości oraz ciężarów właściwych gazów w piecu nie jest wielka. Objętość gazów spalinowych i ich ciężar właściwy oblicza się w tych przypadkach dla średniej temperatury bezwzględnej gazów na początku i na końcu krótkiego odcinka ich drogi.

Uproszczenia powyższe pozwalają na całkowanie równania Daniela Bernoulliego [II-1] na małych odcinkach pieca oraz na posługiwanie się przy obliczaniu ruchu gazów w piecach również i innymi prawami hydromechaniki.

¹⁾ W termodynamice chemicznej równanie Clapeyrona $pV_m = RT$ odnosi się do 1 mola gazów o objętości $V_m = \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$. W tym przypadku stała gazowa R stanowi ilość energii R , przypadającą na 1 mol i 1°K , a jej wymiar wynosi $\frac{\text{kGm}}{\text{mol} \cdot ^\circ\text{K}}$. W termodynamice technicznej równanie Clapeyrona $pv = RT$ odnosi się do 1 kG gazów o objętości właściwej $v = \frac{\text{m}^3}{\text{kG}}$. W tym przypadku R jest ilością energii, przypadającą na 1 kg i 1°K . Wymiar stałej gazowej wobec tego jest: $\frac{\text{kGm}}{\text{kG} \cdot ^\circ\text{K}} = \frac{\text{m}}{^\circ\text{K}}$ (patrz dr inż. Bohdan Stefanowski: Termodynamika techniczna. 1949, str. 65, 69, 70 i 85). W pracy niniejszej równanie Clapeyrona jest przyjęte w postaci stosowanej w termodynamice technicznej.

Prędkość gazów w różnych miejscach pieca oblicza się, jak wiadomo, ze wzoru

$$w = \frac{V}{F} = \frac{G}{\gamma \cdot F} = \frac{G \cdot T}{360 \cdot F} \quad [\text{II-3}]$$

gdzie: V — objętość gazów przepływających przez piec w ciągu 1 sek w m^3/sek ,

G — ich ciężar w kG/sek ,

F — powierzchnia poprzecznego przekroju kanału w m^2 , którym płyną gazy, jeżeli zapełniają one kanał całkowicie, w przeciwnym przypadku jest to powierzchnia przekroju poprzecznego ich strumienia.

Gdy kanał, którym płyną gazy, ma stały przekrój, to jak wynika z równania [II-3], prędkości w różnych jego miejscach są wprost proporcjonalne do temperatur bezwzględnych gazów w tych samych miejscach, tj.

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{T_1}{T_2}, \text{ skąd } w_1 = w_2 \cdot \frac{T_1}{T_2} \quad [\text{II-4}]$$

Z równania [II-3] wynika również, że prędkości w różnych miejscach kanału o stałym przekroju są odwrotnie proporcjonalne do ciężarów właściwych gazów w tych miejscach, czyli

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}, \text{ skąd } w_1 = w_2 \cdot \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \text{ i } w_1 \cdot \gamma_1 = w_2 \cdot \gamma_2 = w \cdot \gamma = \text{const} \quad [\text{II-5}]$$

Ilość gazów przepływających przez piec w jednostce czasu zależy od różnicy ciśnień na początku i na końcu ich drogi.

W strumieniu płynących gazów rozróżnia się ciśnienia statyczne, dynamiczne i geometryczne.

Ciśnienie statyczne, zwane również ciśnieniem manometrycznym lub hydrostatycznym, jest spowodowane różnicą między ciśnieniem gazów w piecu a ciśnieniem wywieranym przez powietrze atmosferyczne.

Wyobraźmy sobie komorę wypełnioną gorącymi gazami spalinowymi i połączoną od dołu z powietrzem (rys. II-3). Jeżeli na poziomie 0—0 rozgraniczającym powietrze i gazy panuje ciśnienie p_0 , a na poziomie 1—1, znajdującym się na wysokości h od poziomu zerowego — ciśnienie p_g , to przyjmując, że ciężar właściwy gazów γ_g nie jest zależny od wysokości, można napisać

$$p_g = p_0 - \gamma_g \cdot h$$

Analogicznie ciśnienie powietrza na poziomie 1—1 poza komorą jest równe

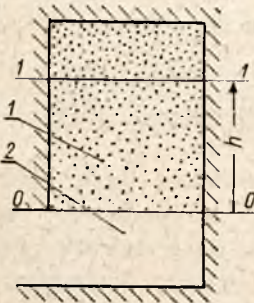
$$p_p = p_0 - \gamma_p \cdot h$$

Wobec tego ciśnienie statyczne gazów na powyższym poziomie równa się

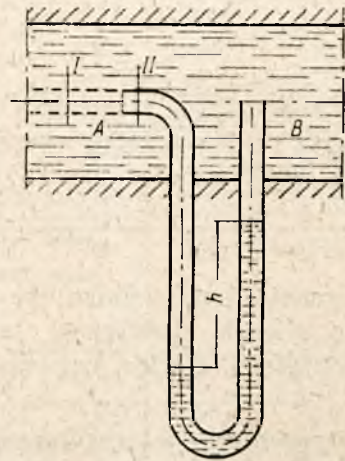
$$p_{st} = p_g - p_p = h (\gamma_p - \gamma_g) \quad [\text{II-6}]$$

Ciśnienie statyczne jest dodatnie, gdy działa do góry, a ujemne, gdy jest skierowane w dół. Ponieważ ciężar właściwy gorących gazów w piecu jest mniejszy od ciężaru powietrza otaczającego piec, to zwykle ciśnienie nieruchomych gazów na poziomie powyżej dna pieca jest większe niż ciśnienie powietrza na zewnątrz. W ten sposób tłumaczy się uchodzenie gorących gazów przez nie zamknięte otwory w sklepieniu pieca lub w jego bocznych ścianach w tym większych ilościach, im wyżej od dna znajduje się otwór.

Ciśnienie dynamiczne jest to ciśnienie, które wywierają będące w ruchu gazy na powierzchnię nieruchomą, prostopadłą do kie-



Rys. II-3. Rysunek pomocniczy do wzoru: 1 — gorące gazy, 2 — zimne powietrze



Rys. II-4. Ciśnienie dynamiczne

runku ruchu. Aby wyjaśnić, że ciśnienie to jest inne niż ciśnienie statyczne, rozpatrzmy kanał (rys. II-4), którym płyną gazy z prędkością w . W kanale tym zamocowano wygiętą rurkę szklaną w taki sposób, że otwór jednego jej końca jest skierowany przeciw strumieniowi gazów w kanale, a otwór drugiego końca jest równoległy do kierunku przepływu strumienia. Rurka zawiera pewną ilość cieczy (np. wody). Meniski jej, w przypadku gdy gaz w kanale jest nieruchomy, znajdują się na jednakowym poziomie w obu częściach rurki. Natomiast gdy gaz jest w ruchu, poziom cieczy w lewej części rurki obniża się w stosunku do poziomu części prawej (rys. II-4), przy czym różnica poziomów jest tym większa, im większa jest prędkość gazów w kanale.

Różnica poziomów cieczy w obu częściach rurki szklanej wskazuje, że ciśnienie w lewej jej części jest większe niż w części prawej. Biorąc pod

uwagę, że ciśnienie statyczne gazu w kanale na tym samym poziomie obu końców rurki jest jednakowe, wyciągamy wniosek, że na ciecz w lewej jej części działa ciśnienie dodatkowe, wywołane parciem poruszającego się w kanale gazu. Ciśnienie to nazywamy właśnie ciśnieniem dynamicznym.

Pisząc równanie Daniela Bernoulliego w postaci całkowitej dla poziomego strumienia gazów o średnicy równej średnicy rurki szklanej (przekrój I) i ograniczonego na rys. II-4 liniami przerywanymi oraz dla gazu nieruchomego, znajdującego się w lewej części tej rurki, stanowiącej przedłużenie powyższego strumienia (przekrój II), otrzymamy

$$\frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{w^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma_2} \quad [\text{II-7}]$$

skąd, przyjmując, że $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$, można napisać

$$\frac{p_2 - p_1}{\gamma} = \frac{w^2}{2g}$$

Różnica pomiędzy ciśnieniem p_2 w lewej części rurki a ciśnieniem statycznym p_1 , jak wynika z powyższego, równa się ciśnieniu dynamicznemu p_d , wobec czego

$$p_d = \gamma \frac{w^2}{2g} \quad [\text{II-8}]$$

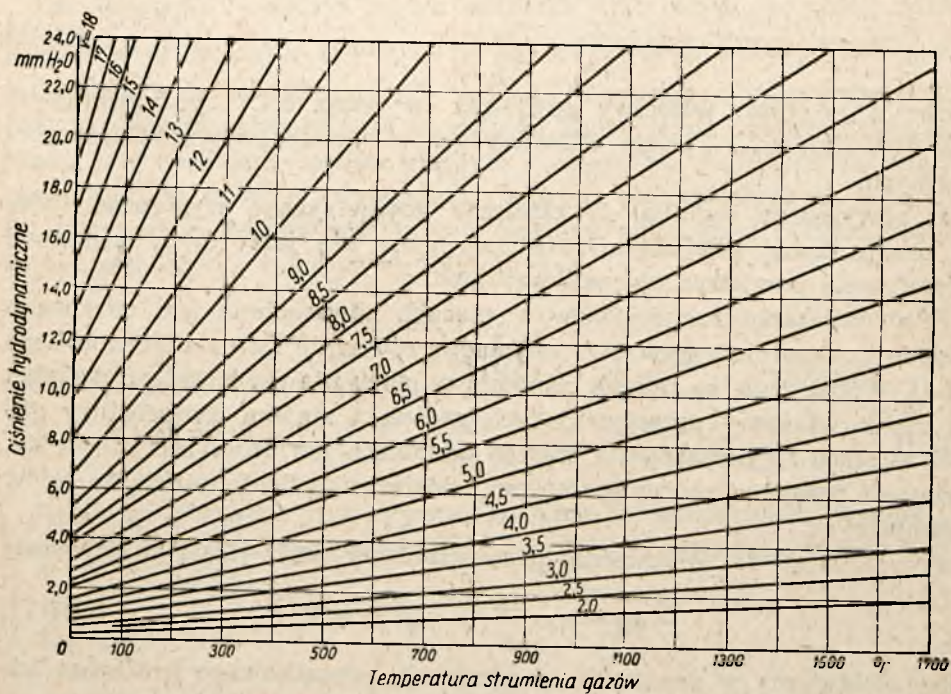
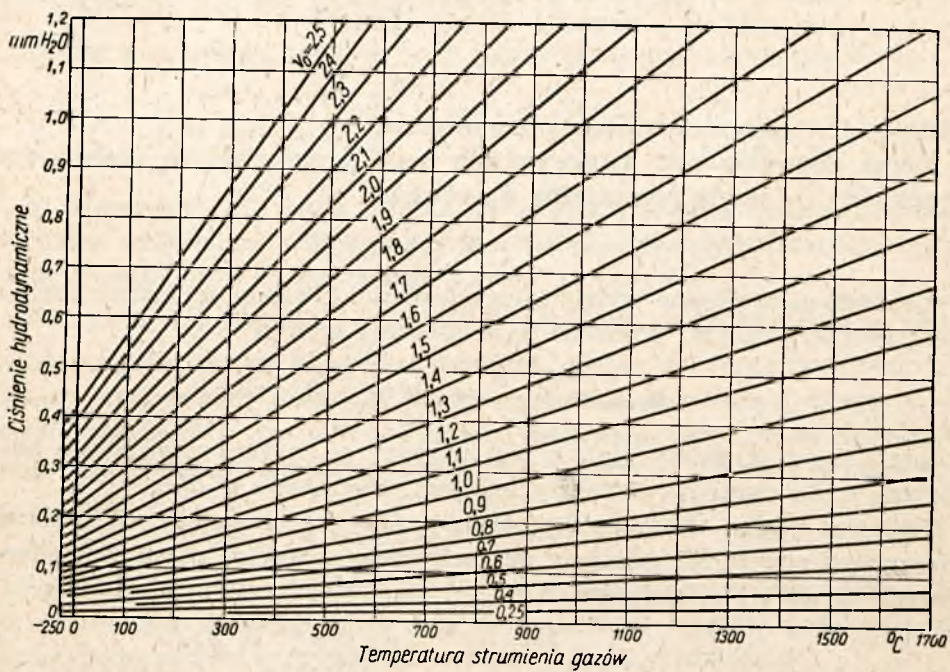
Z równania tego wynika, że ciśnienie dynamiczne gazu równa się liczbowo energii kinetycznej jego strumienia, przypadającej na jednostkę objętości, a więc jest ono proporcjonalne do kwadratu prędkości gazu.

We wzorach charakteryzujących ruch gazów w piecach dogodniej jest w niektórych przypadkach zastępować rzeczywiste prędkości i ciśnienia, które posiadają gazy w temperaturze t , ciężarami właściwymi i prędkościami, które posiadałyby one w warunkach normalnych (temp. 0°C i ciśnienie 760 mm Hg). Prędkości i ciężary właściwe, przeliczone na warunki normalne, będą zależne tylko od powierzchni przekroju i nie będą zależeć od temperatury.

Zastępując więc we wzorze [II-8] ciężar właściwy i prędkość gazów wielkościami sprowadzonymi do warunków normalnych (γ_0 i w_0), otrzymamy

$$p_d = \frac{w_0^2}{2g} \cdot \gamma_0 (1 + \alpha t) = \frac{w_0^2}{2g} \gamma_0 \cdot \frac{273 + t}{273} = \gamma_0 \frac{w_0^2}{2g} \cdot \frac{T}{273} \quad [\text{II-9}]$$

W celu ułatwienia i przyspieszenia obliczeń zostały sporządzone na podstawie wzoru [II-9] wykresy zależności ciśnienia dynamicznego od temperatury dla różnych, najczęściej spotykanych w piecu prędkości gazów. Wykresy te są przedstawione na rys. II-5.



Rys. II-5. Wykresy zależności ciśnienia dynamicznego od temperatury gazu

Ciśnienie geometryczne jest to ciśnienie zależne od wysokości położenia gazu względem pewnego poziomu przyjętego za poziom zerowy. Ciężar każdego ciała, posiadającego objętość V i ciężar właściwy γ , wynosi zgodnie z prawem Archimedesesa

$$G = V (\gamma - \gamma_p)$$

gdzie γ_p jest ciężarem właściwym powietrza.

Biorąc powyższe pod uwagę można napisać, że ciało to posiada na wysokości H energię potencjalną E_p równą

$$E_p = G \cdot H = V (\gamma - \gamma_p) H$$

wobec tego ciało płynne wywiera na wysokości H ciśnienie, zwane ciśnieniem geometrycznym, Wielkość tego ciśnienia wynosi

$$p_{geom} = \frac{G \cdot H}{V} = (\gamma - \gamma_p) \cdot H$$

Jeżeli ciężar właściwy ciała γ jest większy od ciężaru właściwego powietrza γ_p , to ciśnienie geometryczne jest skierowane w dół.

Ponieważ ciężar właściwy gorących gazów jest mniejszy od ciężaru właściwego powietrza, ciśnienie geometryczne gazów w piecu jest skierowane do góry i równa się

$$\begin{aligned} p_{geom} &= \left(\gamma_{op} \frac{273}{273 + t_{pow}} - \gamma_{og} \frac{273}{273 + t_g} \right) \cdot H = \\ &= 273 \cdot H \left(\frac{\gamma_{op}}{T_{pow}} - \frac{\gamma_{og}}{T_g} \right) \end{aligned} \quad \text{[II-10]}$$

gdzie: γ_{op} — ciężar właściwy powietrza (w temp. 0°C i pod ciśnieniem 760 mm Hg), γ_{og} — ciężar właściwy gazów również w warunkach normalnych.

Z powyższego wynika, że ciśnienie geometryczne występuje tylko w przypadkach, gdy ciężar właściwy gazu nie jest równy ciężarowi właściwemu powietrza otaczającego piec.

Przy obliczaniu ruchu gazów w piecach powszechnie jest stosowane podane poprzednio i częściowo omówione równanie Daniela Bernoulliego [II-1]. Wobec tego, że zmiana ciśnienia w piecu nie ma istotnego wpływu na ciężar właściwy przepływających gazów, a zmiana temperatury gazów w piecu na dostatecznie małych odcinkach ich drogi jest niewielka, równanie powyższe można scałkować z dostateczną dokładnością do celów technicznych.

Przystępując do całkowania, przekształcamy wzór [II-1] w równanie

$$-dp = \gamma w \frac{dw}{g} + \gamma dh + \gamma dZ \quad \text{[II-11]}$$

które całkujemy w granicach od przekroju początkowego krótkiego odcinka drogi gazów w piecu do przekroju końcowego, otrzymując

$$p_1 - p_2 = \frac{\gamma_1 w_1}{g} (w_2 - w_1) + \int_1^2 \gamma dh + \int_1^2 \gamma dZ \quad [\text{II-12}]$$

ponieważ, jak wynika ze wzoru [II-5], $\gamma w = \gamma_1 w_1$.

Biorąc pod uwagę, że $\gamma_1 = \gamma_2 \frac{w_2}{w_1}$, otrzymamy po przekształceniach

$$p_1 - p_2 = 2 \left(\gamma_2 \frac{w_2^2}{2g} - \gamma_1 \frac{w_1^2}{2g} \right) + \int_1^2 \gamma \cdot dh + \int_1^2 \gamma \cdot dZ \quad [\text{II-13}]$$

Z powyższego równania wynika, że spadek ciśnienia hydrostatycznego w piecu zużywa się na powiększenie ciśnień hydrodynamicznego i geometrycznego oraz na pokonanie oporów przepływu.

Ostatni wyraz równania $\int_1^2 \gamma \cdot dZ$ jest właśnie stratą ciśnienia na pokonanie oporów, które napotyka strumień gazów na rozpatrywanym odcinku przebywanej drogi. W hydromechanice technicznej przyjęto, że strata ciśnienia i strata wysokości na pokonanie oporów są proporcjonalne do kwadratu prędkości przepływu płynów i wyrażają się wzorami

$$p_{str} = \xi \cdot \gamma \frac{w^2}{2g} \text{ kG/m}^2 \text{ lub } Z = \xi \frac{w^2}{2g} \text{ m} \quad [\text{II-14}]$$

gdzie ξ jest współczynnikiem oporów. Wielkość tego współczynnika ustala się zwykle doświadczalnie lub na podstawie wzorów empirycznych, które będą podane i omówione w pktcie 3 tego rozdziału.

Dla ustalenia wielkości zmian ciśnienia statycznego w piecu należy scałkować drugi wyraz równania [II-13], czyli całkę $\int_1^2 \gamma dh$. Rozwiązanie jej wymaga jednak znajomości rozkładu temperatur w strumieniu gazów w piecu w zależności od wysokości. Teoretyczne ustalenie tego rozkładu jest zadaniem bardzo trudnym i często niemożliwym do rozwiązania. Dlatego w wielu przypadkach musimy poprzestawać na założeniu, że na pewnym dostatecznie małym odcinku strumienia rozkład temperatur jest liniową funkcją wysokości, czyli

$$T = T_0 + a \cdot h \quad \text{i} \quad dT = a \cdot dh \quad [\text{II-15}]$$

Biorąc pod uwagę, że $\gamma = \gamma_0 \frac{273}{T}$ oraz że $dh = \frac{dT}{a}$, otrzymamy

$$\int_1^2 \gamma \cdot dh = \int_1^2 \gamma_0 \frac{273}{T} \cdot \frac{dT}{a} = \frac{\gamma_0 273}{a} \ln \frac{T_2}{T_1} \quad [\text{II-16}]$$

Jeżeli na początku rozpatrywanego odcinka temperatura wynosi T_1 , a na końcu T_2 , to na podstawie równania [II-15] można napisać

$$T_1 = T_0 + ah_1 \quad \text{i} \quad T_2 = T_0 + ah_2 \quad [\text{II-17}]$$

wobec tego

$$a = \frac{T_2 - T_1}{h_2 - h_1} \quad [\text{II-18}]$$

Podstawiając powyższą wartość na a do równania [II-16], otrzymamy, że wielkość zmiany ciśnienia hydrostatycznego wynosi

$$\int_1^2 \gamma dh = \frac{\gamma_0}{T_2 - T_1} \frac{273(h_2 - h_1)}{T_2} \ln \frac{T_2}{T_1} \quad [\text{II-19}]$$

Po podstawieniu otrzymanych wyników do równania [II-13] będziemy mieli

$$p_1 - p_2 = 2 \left(\gamma_2 \frac{w_2^2}{2g} - \gamma_1 \frac{w_1^2}{2g} \right) + \gamma_0 \frac{273(h_2 - h_1)}{T_2 - T_1} \ln \frac{T_2}{T_1} + p_{str} \quad [\text{II-20}]$$

W przypadku gdy gazy w piecu płyną kanałami poziomymi, wysokości h_2 i h_1 są sobie równe, wobec tego równanie [II-20] nieco się upraszcza i przybiera postać

$$p_1 - p_2 = 2 \left(\gamma_2 \frac{w_2^2}{2g} - \gamma_1 \frac{w_1^2}{2g} \right) + p_{str} \quad [\text{II-21}]$$

Z równania [II-21] wynika, że podczas przepływu gazów kanałami poziomymi spadek ciśnienia w piecu równa się podwojonemu przyrostowi ciśnienia dynamicznego, powiększonemu o stratę ciśnienia na pokonanie oporów przepływu.

Równanie [II-20] i [II-21] należy stosować na tych odcinkach drogi gazów w instalacji piecowej, na których zachodzi znaczna zmiana temperatury, a więc przy obliczeniach regeneratorów, rekuperatorów, ekonomizerów itp. Na odcinkach zaś, na których temperatura gazów zmienia się stosunkowo niewiele, można stosować równanie Daniela Bernoulliego dla przepływu izotermicznego

$$\frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{w_1^2}{2g} + h_1 = \frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{w_2^2}{2g} + h_2 + Z \quad [\text{II-22}]$$

ponieważ, jak było wyjaśnione poprzednio, ciężar właściwy gazów niewiele się zmienia w piecu ze zmianą ciśnienia. Należy jednak pamiętać, że błąd popełniony wskutek stosowania równania [II-22] zamiast równania [II-20] jest tym większy, im większe są zmiany temperatury na rozpatrywanych odcinkach strumienia gazów.

Ruch gazów w piecu i jego kanałach, podobnie jak ruch cieczy w przewodach, może być laminarny lub burzliwy. Przy ruchu laminarnym lub inaczej uwarstwionym gazy poruszają się równoległymi koncentrycznymi warstwami ze wzrastającymi prędkościami od ścian ku środkowi strumienia.

Prędkość średnia całego strumienia jest przy tym stosunkowo niewielka i równa się połowie prędkości maksymalnej ($w_{sr} = 1/2 w_{max}$), którą posiadają gazy na osi strumienia.

Ruch burzliwy występuje przy dużych średnich prędkościach gazów w kanałach pieca. Poszczególne cząstki gazu przy ruchu burzliwym poruszają się chaotycznie w różnych kierunkach po bardzo skom-

plikowanych i ciągle zmieniających się torach. Całkowita jednak masa gazu zachowuje w swym ruchu kierunek wyznaczony przez kanały, natomiast średnia prędkość gazów jest większa od połowy prędkości maksymalnej na osi strumienia.

Zarówno przy ruchu laminarnym, jak i burzliwym wskutek adhezji przy ścianach kanałów i na powierzchni wyrobów ogrzewanych w piecu powstaje cienka, nieruchoma warstwa gazów, tzw. warstwa graniczna, która wywiera duży wpływ na przebieg wymiany ciepła pomiędzy gazami w piecu a jego ścianami oraz ogrzewanymi w nim materiałami. Grubość warstwy granicznej zależy od prędkości gazów. Ze wzrostem prędkości grubość maleje.

Charakter ruchu w piecu zależy od prędkości, ciężaru właściwego i lepkości poruszających się w kanałach pieca gazów oraz od średnicy hydraulicznej kanału. Przy określonym stosunku powyższych wielkości ruch laminarny przechodzi w ruch burzliwy i na odwrót. Warunki tego przejścia ustalił Reynolds. Kryterium Reynoldsa jest wielkością bezwymiarową, zwaną często liczbą Reynoldsa Re , która równa się

$$Re = \frac{wd\gamma}{g\mu} \quad [\text{II-23}]$$

gdzie: μ — lepkość dynamiczna gazu w $\text{kG} \cdot \text{sek}/\text{m}^2$,

d — średnica hydrauliczna kanału w m.

średnica hydrauliczna kanału zależy od przekroju poprzecznego kanału F i jego obwodu zwilżonego S . Zależność powyższa wyrażona jest wzorem

$$d = \frac{4F}{S} \text{ m} \quad [\text{II-24}]$$

Jeżeli liczba Reynoldsa Re jest mniejsza od 2320, to gazy poruszają się w kanałach ruchem laminarnym, w przeciwnym przypadku, tj. przy $Re > 2320$, ruch gazów jest burzliwy.

W rzeczywistości, jak wykazują obserwacje, ruch zmienia się nie od razu; przy prędkościach bliskich prędkości krytycznej

$$w_{kr} = 2320 \frac{g \cdot \mu}{d \cdot \gamma} \quad [\text{II-25}]$$

charakter ruchu jest chwiejny. Przy spokojnym dopływie gazów do kanałów o gładkich ścianach oraz w braku innych przyczyn wywołujących zaburzenia ruch laminarny może być zachowany również przy prędkościach wyższych od prędkości krytycznej. Natomiast różne przyczyny (np. ostre brzegi otworu wejściowego do kanału, zasuw i inne urządzenia oraz wypełnienia regeneratorów) mogą wywoływać zaburzenia w ruchu laminarnym i ułatwić jego przejście w ruch burzliwy.

Ruch laminarny w piecach spotyka się rzadko. W nowoczesnych piecach mamy do czynienia z ruchem burzliwym, ponieważ gazy, poruszając się w nich ruchem wymuszonym, posiadają duże prędkości.

3. Opory ruchu gazów

Spadek ciśnienia w piecu i jego kanałach jest spowodowany oporami, które pokonują gazy, przepływając przez instalację piecową. Opory bywają dwóch rodzajów:

a. opory spowodowane tarciem wewnętrznym gazów oraz tarciem o ściany kanałów, występujące na całej długości drogi gazów w piecu,

b. opory miejscowe, powstające w tych miejscach instalacji piecowej, gdzie zachodzi zmiana kierunku (załamanie lub zakrzywienie) kanału, którym płyną gazy, lub zmiana wielkości jego przekroju poprzecznego.

Opór wskutek tarcia jest wprost proporcjonalny do długości kanału, którym płynie gaz, oraz odwrotnie proporcjonalny do jego średnicy hydraulicznej. Poza tym zgodnie z prawem Newtona jest on zależny od lepkości gazu, jego gęstości i prędkości, a więc jest funkcją liczby Reynoldsa Re .

Stratę ciśnienia na pokonanie oporów tarcia można więc obliczyć ze wzoru [II-14], przyjmując, że

$$\xi = f(Re) \cdot \frac{l}{d} = \lambda \frac{l}{d} \quad \text{[II-26]}$$

gdzie l jest długością kanału w m.

Ze wzorów [II-14] i [II-26] wynika, że

$$p_{str} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\gamma w^2}{2g} \quad \text{[II-27]}$$

Współczynnik λ jest funkcją liczby Reynoldsa i dlatego dla ruchu laminarnego będzie on inny niż dla ruchu burzliwego.

Przy ruchu laminarnym bowiem mniejsze nierówności ścian kanałów pokrywa nieruchoma warstwa graniczna, większe zaś opływają gazy łagodnie z małą stosunkowo prędkością. Więc nierówności ścian niewiele wpływają przy ruchu laminarnym na wielkość oporu i współczynnika λ . Przy ruchu burzliwym warstwa graniczna jest cieńsza, wskutek czego nierówności ścian, wywołując zaburzenia, mają znacznie większy wpływ na wielkość oporu i współczynnika λ .

W przypadku przepływu laminarnego znaczenie funkcji $\lambda = f(Re)$ można wprowadzić teoretycznie i wyrazić stosunkowo prostym wzorem

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad \text{[II-28]}$$

Wyprowadzenie tej zależności dla kanału o przebiegu kołowym można znaleźć w wielu pracach zarówno teoretycznych, jak i technicznych¹⁾.

¹⁾ J. Ciborowski: Inżynieria chemiczna. PWT. Warszawa 1955.

A. G. Kasatkin: Podstawowe procesy i aparaty w technologii chemicznej. PWT. Warszawa 1954.

W przypadku kanałów o przekrojach innych niż przekrój kołowy wzór [II-28], zachowując swoją postać, zmienia tylko wartość liczbową licznika z 64 na inną, np. dla kanału o przekroju kwadratowym na 57, dla kanału prostokątnego, którego jeden bok jest dwukrotnie większy od drugiego, na 62, jeżeli zaś jeden bok kanału jest większy od drugiego 3 lub 4 razy, to licznik we wzorze [II-28] należy zmienić odpowiednio na 69 lub 73.

W przypadku ruchu burzliwego nie udaje się wyprowadzić teoretycznie znaczenia funkcji $\lambda = f(\text{Re})$ i ogólnego wzoru na obliczanie wartości współczynników oporu. Wartość tej funkcji znajdujemy doświadczalnie, stosując teorię podobieństwa.

Na podstawie wielkiej liczby doświadczeń został wyprowadzony następujący wzór na współczynnik λ dla ruchu burzliwego, słuszny dla wartości liczby Re nie przekraczającej 100 000

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{\text{Re}}} \quad \text{[II-29]}$$

W zakresie wartości liczby Reynoldsa od 100 000 do 3 200 000 Nikuradze wyprowadził wzór

$$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}} \quad \text{[II-30]}$$

Mgr inż. Roman Andrzejewski ¹⁾ podaje na obliczenie straty ciśnienia wskutek tarcia p_{tarc} następujący wzór:

$$\Delta p_{\text{tarc}} = b \cdot \frac{\gamma^{0,852} \omega^{1,924}}{d^{1,281}} \text{ mm H}_2\text{O} \quad \text{[II-31]}$$

W powyższym wzorze wartość współczynnika $b = 11,32$ dla murowanych kanałów zanieczyszczonych pyłem i dla wilgotnego gazu przy $u < 3$ m/sek, a przy > 3 m/sek $b = 8,5$, w przypadku zaś bardzo dużych ilości osadów w kanałach $b = 17$. Dla gładkich rur metalowych w przewodach gazowych $b = 5,66$.

Gdy nie chodzi o dużą dokładność, można przyjąć, że dla gładkich kanałów murowanych współczynnik $\lambda = 0,04$, dla chropowatych zaś $\lambda = 0,05$, a dla przewodów gazowych ze stali — od 0,03 do 0,04.

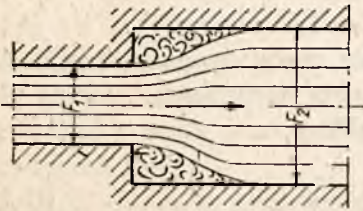
Opory miejscowe są znacznie większe niż opory powstające wskutek tarcia. Występują one w tych miejscach kanałów i przewodów gazowych, w których zmienia się kierunek strumienia, a więc wszędzie tam, gdzie zachodzi załamanie lub zakrzywienie kanałów. Powstają one również w miejscach, w których zachodzi zmiana wielkości poprzecznego przekroju kanałów, czyli występuje ich rozszerzenie lub zwężenie. Opory miejscowe wywołują zasuwy, przepustnice, zwężki, przyrządy pomiaro-

¹⁾ Kalendarz Chemiczny, t. II-2, str. 195. PWT. Warszawa 1955.

we i kontrolne oraz inne urządzenia zamontowane w kanałach lub w przewodach gazowych na drodze przepływających przez nie gazów.

Na ogół współczynnik oporów miejscowych ustala się na podstawie danych doświadczalnych i tylko w przypadku nagłego rozszerzenia się kanału (rys. II-6) można określić znaczenie współczynnika oporów ξ w sposób teoretyczny.

Jeżeli przez wąską część kanału (rys. II-6) o przekroju $F_1 \text{ m}^2$ płynie strumień gazów o prędkości $w_1 \text{ m/sek}$ pod ciśnieniem $p_1 \text{ kG/m}^2$, a w szerokiej części kanału o przekroju $F_2 \text{ m}^2$ strumień ten posiada ciśnienie



Rys. II-6. Nagłe rozszerzenie się kanału

$p_2 \text{ kG/m}^2$ i prędkość $w_2 \text{ m/sek}$, to na płaszczyznę F_2 w szerszym przekroju będzie działać parcie $p_1 F_2$ od strony szybkiego strumienia oraz w kierunku przeciwnym — parcie $p_2 F_2$ od strony strumienia płynącego wolno. Wskutek tego w nieskończenie krótkim okresie czasu $d\tau$ nastąpi przyrost popędu (impulsu) strumienia, który wyniesie

$$p_1 F_2 \cdot d\tau - p_2 F_2 d\tau = (p_1 - p_2) F_2 d\tau$$

Przez nieskończenie krótki okres czasu $d\tau$ przepłynie przez kanał nieskończenie mała masa gazu $dM = \frac{\gamma}{g} \cdot F_2 w_2 \cdot d\tau$, która posiada pęd wynoszący

$$dM \cdot w = \frac{\gamma}{g} F_2 \cdot w_2 \cdot d\tau \cdot w$$

Biorąc pod uwagę, że według drugiej zasady mechaniki przyrost pędu (ilości ruchu) w pewnym okresie czasu równa się przyrostowi popędu w tym samym okresie czasu, to można napisać

$$\frac{\gamma}{g} F_2 w_2 \cdot d\tau (w_2 - w_1) = (p_1 - p_2) F_2 d\tau$$

skąd

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \frac{w_2 (w_2 - w_1)}{g} \quad \text{[II-32]}$$

Stosując równanie Daniela Bernoulliego [II-22] dla przekrojów I i II (rys. II-6), otrzymamy

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} + Z$$

oraz

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \left(\frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} \right) + Z \quad \text{[II-33]}$$

Z równań [II-32] i [II-33] wynika, że

$$Z = \frac{w_2 (w_2 - w_1)}{g} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g}, \text{ skąd } Z = \frac{(w_1 - w_2)^2}{2g} \quad \text{[II-34]}$$

Biorąc pod uwagę wzór [II-14], można napisać

$$\xi = \frac{w_2^2}{2g} = \frac{(w_1 - w_2)^2}{2g} = \frac{w_1^2}{2g} \left(1 - \frac{w_2}{w_1}\right)^2$$

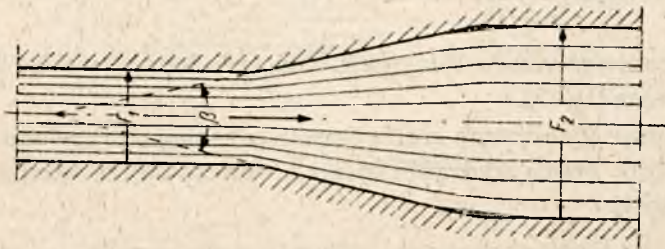
wobec czego współczynnik oporu ξ wskutek nagłego rozszerzenia się kanału (rys. II-6) wynosi

$$\xi = \left(1 - \frac{w_2}{w_1}\right)^2 = \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)^2 \quad [\text{II-35}]$$

albowiem prędkości są odwrotnie proporcjonalne do powierzchni przekrojów kanału.

Prędkość strumienia gazów w rozszerzonym kanale jest mniejsza niż w kanale o przekroju pierwotnym: $w_2 < w_1$, wobec tego zgodnie z równaniem [II-32] ciśnienie $p_2 > p_1$, czyli pomimo oporów ciśnienie gazów w rozszerzonym kanale jest większe niż w kanale pierwotnym. Dlatego właśnie następuje pewien ruch powrotny w miejscach, gdzie nastąpiło gwałtowne zwiększenie przekroju i powstają wiry w „kątach” rozszerzenia.

Wzór [II-35] jest słuszny dla przewodów dowolnego kształtu. W przypadku gdy gazy wypływają z kanałów do dużych komór, dla których F_2



Rys. II-7. Stopniowe rozszerzanie się kanału

jest wielokrotnie większe od F_1 przyjmuje się z dostateczną do celów technicznych dokładnością, że $\xi = 1$.

W tabelicy II-1 podane są wartości współczynnika ξ w zależności od stosunku $\frac{F_1}{F_2}$, obliczone ze wzoru [II-35].

Tablica II-1

WSPÓŁCZYNNIK OPORU ξ PRZY NAGŁYM ROZSZERZENIU SIĘ KANAŁU

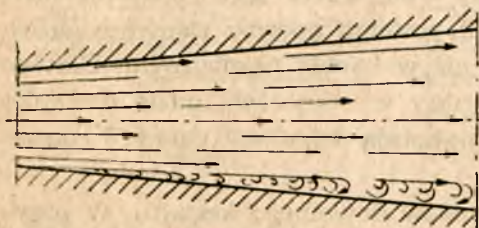
$F_1:F_2$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
ξ	0,81	0,64	0,49	0,36	0,25	0,16	0,09	0,04	0,01	0

Ażeby zmniejszyć opór spowodowany powiększeniem się przekroju kanału, wykonuje się stopniowe przejście od przekroju mniejszego do

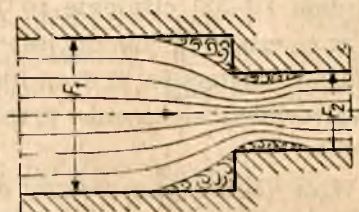
przekroju większego, jak pokazano na rys. II-7. Współczynnik oporu przy łagodnie rozszerzającym się kanale (rys. II-7) oblicza się ze wzoru A. Fliegnera.

$$\xi = \left(1 - \frac{F_1}{F_2} \right)^2 \cdot \sin \beta \quad [\text{II-36}]$$

Wzór ten jest słuszny, gdy kąt β jest mniejszy od 10° , w przeciwnych przypadkach następuje odrywanie się prądu cieczy od zbyt silnie rozszerzających się ścian kanału i powstawanie prądów powrotnych (rys. II-8), ponieważ ciśnienie gazu, jak było wyjaśnione poprzednio, w węższej części przewodu jest mniejsze niż w części szerszej. Prądy te są przyczyną powstawania wirów. Jeżeli kąt β jest większy od 14° ,



Rys. II-8. Prądy powrotne w rozszerzającym się kanale



Rys. II-9. Nagłe zwięźnienie się kanału

nie należy stosować wzoru Fliegnera. Znacznie lepsze wyniki daje w tym przypadku wzór [II-35].

Gdy następuje gwałtowne zmniejszenie przekroju przewodu (rys. II-9), to współczynnik oporu hydraulicznego ξ oblicza się ze wzoru empirycznego Weisbacha

$$\xi = 0,04 + \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2 \quad [\text{II-37}]$$

gdzie α jest współczynnikiem zwięźnienia strumienia gazu w mniejszym kanale (rys. II-15), czyli jest to stosunek przekroju strumienia w miejscu największego zwięźnienia do przekroju mniejszego kanału.

We wzorze Weisbacha [II-37] stała 0,04 odpowiada stratom spowodowanym działaniem krawędzi dławiącej przepływ strumienia, natomiast wyraz $\left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2$ uwzględnia straty wywołane zwięźnieniem się i następnie ponownym rozszerzeniem się strumienia. Zarówno wartości α , jak i ξ

Tablica II-2

WSPÓŁCZYNNIK OPORU ξ PRZY NAGŁYM ZWĘŻENIU SIĘ KANAŁU

$F_2:F_1$	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
ξ	0,5	0,47	0,45	0,38	0,34	0,30	0,25	0,2	0,15	0,09	0

zależą od stosunku przekrojów kanałów. Wielkość ξ podana jest w tabl. II-2 (wg A. G. Kasatkina).

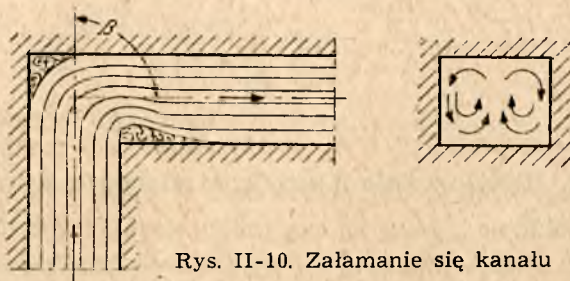
W przypadku gdy w kanale stopniowo zmniejsza się przekrój (na rys. II-7 strzałkę odwrócić), współczynnik oporu, a więc i strata ciśnienia są mniejsze. Współczynnik oporu ξ zależy w tym przypadku od wartości kąta β . Zależność ta jest podana w tabl. II-3.

Tablica II-3

WSPÓŁCZYNNIK OPORU ξ PRZY STOPNIOWYM ROZSZERZANIU SIĘ KANAŁU											
β	7°	10°	15°	20°	25°	30°	40°	45°	60°	75°	85°
ξ	0,16	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36

Opory, powstające w miejscach zmiany kierunku strumienia wywołanego załamaniem (rys. II-10) lub zakrzywieniem (rys. II-11) kanałów, zachodzą na skutek działania sił bezwładności względnie sił odśrodkowych na strumień gazów.

Obserwując charakter ruchu w miejscu załamania kanału (rys. II-10), stwierdzimy, że wytwarzają się w pobliżu tych miejsc tzw. martwe



Rys. II-10. Załamanie się kanału

przestrzenie, w których powstają wiry, natomiast główny strumień ulega zwężeniu. Poza tym w kanale powstaje również ruch poprzeczny (rys. II-10), będący dodatkową przyczyną oporów.

Współczynnik oporów ξ w przypadku załamania kanału pod kątem β oblicza się z następującego wzoru Weisbacha:

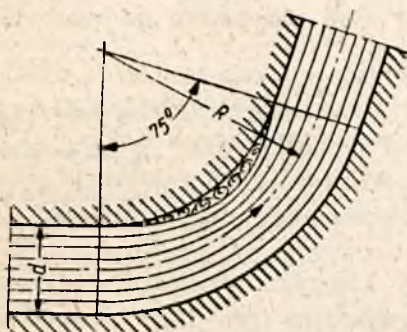
$$\xi = \sin^2 \frac{\beta}{2} + 2 \sin^4 \frac{\beta}{2} \quad [\text{II-38}]$$

Wielkości współczynnika ξ dla różnych wartości kąta β , obliczone ze wzoru [II-38], są podane w tabl. II-4.

Tablica II-4

WSPÓŁCZYNNIK OPORU ξ PRZY NAGŁYM ZAŁAMANIU SIĘ KANAŁU										
β	20°	40°	60°	80°	90°	100°	120°	140°	160°	180°
ξ	0,09	0,14	0,37	0,75	1,00	1,27	1,87	2,43	2,85	3,00

Znacznie mniejsze opory występują wtedy, gdy kanał się zakrzywia (rys. II-11). W tym przypadku współczynnik ξ dla przewodu gazowego o przekroju kołowym oblicza się ze wzoru



Rys. II-11. Zakrzywienie się kanału

$$\xi = \left[0,131 + 0,16 \left(\frac{d}{R} \right)^{3,5} \right] \frac{\beta}{90^\circ} \quad \text{[II-39]}$$

a dla kanału o przekroju prostokątnym ze wzoru

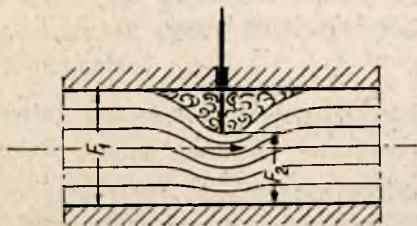
$$\xi = \left[0,124 + 0,274 \left(\frac{d}{R} \right)^{3,5} \right] \frac{\beta}{90^\circ} \quad \text{[II-40]}$$

We wzorach powyższych d jest średnicą lub wysokością przekroju poprzecznego kanału w m, R — promieniem zakrzywienia w m, a β — kątem łuku, jak pokazano na rys. II-11.

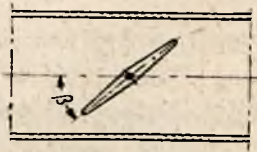
Współczynnik oporu spowodowanego przez niecałkowicie otwartą zasuwę (rys. II-12) można obliczyć ze wzoru

$$\xi = \left(\frac{F_1}{0,65 \cdot F_2} - 1 \right)^2 \quad \text{[II-41]}$$

a w przypadku przepustnicy (rys. II-13) wartość ξ można przyjmować z tabl. II-5 w zależności od kąta β uchylenia przepustnicy.



Rys. II-12. Zakłócenia spowodowane zasuwą



Rys. II-13. Przepustnica

Jeżeli w kanałach na drodze gazów są umieszczone prostopadle do kierunku ich ruchu pęki rur rekuperatora, kotła parowego lub podgrze-

Tablica II-5

WSPÓŁCZYNNIK OPORU ξ PRZEPUSTNICY

β	5	10	20	30	40	45	50	60	65
ξ	0,24	0,52	1,54	3,91	10,8	18,7	32,6	118	751

wacza wody, to współczynnik oporu ξ oblicza się ze wzorów K. C. Morozowa, które dla rurek rozmieszczonych w szachownicę (rys. II-14 b) mają postać

$$\xi = (4 + 6,6 m) \operatorname{Re}^{-0,28} \quad \text{przy } x_1 < x_2 \quad [\text{II-42}]$$

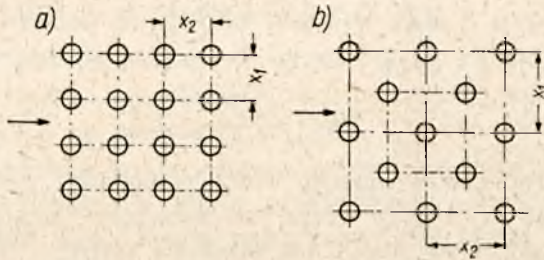
$$\xi = (5,4 + 3,4 m) \operatorname{Re}^{-0,28} \quad \text{przy } x_1 > x_2 \quad [\text{II-43}]$$

a dla rurek ustawionych szeregowo (rys. II-14 a)

$$\xi = (6 + 9 m) \left(\frac{x_1}{d} \right)^{-2,3} \cdot \operatorname{Re}^{-0,26} \quad [\text{II-44}]$$

gdzie m oznacza liczbę rzędów rurek, liczonych w kierunku ruchu gazu.

Przy przepływie gazów przez warstwę paliwa znajdującego się na rusztach albo przez warstwę kamienia wapiennego, lub innych mate-



Rys. II-14. Schematy rozmieszczenia rurek a) szeregowo, b) w szachownicę

riałów ziarnistych w piecach szybowych, lub przez wypełnienie regeneratorów itp. strumień gazów dzieli się na szereg cienkich strumyczków, które płyną między ziarnami jak gdyby przez kanaliki o nieprawidłowym kształcie i zmiennym przekroju. Podczas tego ruchu poszczególne strumyczki spotykają się i łączą ze sobą, a następnie znowu się rozdzielają.

Jeżeli materiał ziarnisty, przez który przepływają gazy, leży równomiernie na drodze ich przepływu i poszczególne jego kawałki są niewielkie w porównaniu z przekrojem kanału lub szybu, to z dostateczną do celów technicznych dokładnością można przyjąć, że opór warstwy materiału jest proporcjonalny do jej grubości. Współczynnik oporu ξ w tym przypadku oblicza się dla l m grubości warstwy, mierzonej w kierunku ruchu gazów.

Współczynnik oporu warstwy materiału ziarnistego o grubości $l = 1$ m można obliczyć w tych przypadkach ze wzoru

$$\xi = \lambda' \frac{1}{\delta} \quad [\text{II-45}]$$

gdzie: δ — średnia średnica kawałków materiału w m,
 λ' — współczynnik tarcia w warstwie materiału.

Oczywiście, współczynnik λ' zależy w dużym stopniu od gęstości ułożenia kawałków materiału w warstwie, a więc od tego, jak wielkie są przestrzenie między nimi. Gdy materiał sypki składa się z kawałków o różnych wymiarach, jego gęstość jest zwykle większa niż w przypadku kawałków jednakowych: Porowatość warstwy materiałów ziarnistych, z którymi mamy zwykle do czynienia w piecach, jak podaje prof. W. P. Linczewski, waha się w granicach 0,4—0,5, wskutek czego współczynnik λ' dla różnych materiałów ziarnistych jest w przybliżeniu (wg prof. Linczewskiego) jednakowy i można go obliczać dla izotermicznego ruchu laminarnego przy $Re < 40$ z następującego wzoru:

$$\lambda' = \frac{64}{Re} \quad \text{[II-46]}$$

a dla izotermicznego ruchu burzliwego przy $40 < Re < 20\,000$ ze wzoru

$$\lambda' = 0,24 Re^{-0,2} \quad \text{[II-47]}$$

We wzorach [II-46] i [II-47] liczbę Reynoldsa oblicza się z zależności

$$Re = \frac{w_{um} \cdot \delta}{\gamma} \quad \text{[II-48]}$$

gdzie: w_{um} — prędkość w m/sek, którą posiadałby gaz, gdyby kanał lub szyb były wolne od materiału ziarnistego,

δ — średnia arytmetyczna średnica ziarn.

Wielkość poprzecznego przekroju kanału lub szybu nie ma wpływu, jak wykazały liczne badania, na opory, jeżeli tylko wymiary kawałków materiału ziarnistego są dostatecznie małe w porównaniu z wymiarami poprzecznymi kanału.

Opór stawiany przez materiały ziarniste można również obliczyć ze wzoru zalecanego przez Instytut Techniki Ciepłej w ZSRR

$$\Delta p = a \gamma H w^n \quad \text{mm H}_2\text{O} \quad \text{[II-49]}$$

gdzie: H — wysokość (grubość) warstwy w m, a , n — współczynniki zależne od średniej średnicy kawałków. Wartości a i n dla kawałków o nieprawidłowym kształcie i ostrych krawędziach podano w tabl. II-6.

Tablica II-6

ZALEŻNOŚĆ WSPÓLCZYNNIKÓW a i n OD ŚREDNICH WIELKOŚCI KAWAŁKÓW (ZIARN)

Współ- czynnik	Przeciętna średnica kawałków w mm						
	1	2	4	6	10	15	20
n	1,35	1,37	1,44	1,51	1,64	1,76	1,85
a	3,59	2,05	1,36	0,70	0,28	0,13	0,09

Opór paliwa na ruszcie zależy od wielu czynników między innymi od wielkości jego kawałków, natężenia powierzchni rusztów, współczyn-

nika nadmiaru powietrza itd. Wyrażenie wpływu tych czynników na opór warstwy paliwa przy pomocy dostatecznie dokładnych wzorów matematycznych nie jest możliwe. W celach orientacyjnych dla oceny oporu paliwa z grubsza można stosować następujące wzory:

1. dla niespiekających się węgla kamiennych

$$\Delta p = 3 \left(\frac{B}{100R} \right)^2 \cdot \left(\frac{10}{CO_2} \right)^2 \text{ mm H}_2\text{O} \quad [\text{II-50}]$$

2. dla spiekających się węgla

$$\Delta p = 5 \left(\frac{B}{100R} \right)^2 \cdot \left(\frac{10}{CO_2} \right)^2 \text{ mm H}_2\text{O} \quad [\text{II-51}]$$

gdzie: B — zużycie paliwa w kG/godz,

R — powierzchnia rusztów w m²,

CO_2 — zawartość dwutlenku węgla w gazach spalinowych według Orsata.

Opór, który stawia wypełnienie regeneratorów, zależy od rodzaju wypełnienia. Będzie on omówiony w pktcie 7, rozdz. IV.

Wyroby umieszczone w komorze roboczej pieca stawiają również opór przepływającym gazom. W wielu przypadkach przy luźnym ich ustawieniu na trzonie pieca oporu powyższego nie bierze się pod uwagę, wychodząc z założenia, że istniejąca w dobrze obliczonych piecach rezerwa ciśnienia wystarczy na jego pokonanie. Natomiast gdy wypalane w piecu wyroby całkowicie wypełniają komorę roboczą, jak np. w piecach kręgowych lub komorowych do wypalania cegieł i innych wyrobów ceramicznych, opór ich jest znaczny i należy go w obliczeniach technicznych pieców uwzględniać.

Jak już było poprzednio powiedziane, ruch gazów w piecach odbywa się na skutek ciągu kominowego albo pod działaniem wentylatorów, ekshaustorów i inżektorów. Ażeby zainstalować właściwe urządzenie do wytwarzania ciągu, należy znać spadek ciśnienia gazów podczas ich przepływu przez piec. W celu obliczenia tego spadku dzieli się drogę gazów w instalacji pieców na poszczególne odcinki, których długości i granice zależą od konstrukcji pieca. Należy przy tym uważać, aby powyższe odcinki miały przekroje poprzeczne jednakowej wielkości.

Następnie oblicza się spadki ciśnienia dla każdego odcinka oddzielnie i dodaje się uzyskane wyniki. W ten sposób otrzymana suma będzie równa spadkowi ciśnienia gazów w całym piecu.

Rozpatrzmy dla przykładu schemat postępowania przy obliczaniu spadku ciśnienia w piecu do wypalania wyrobów, przedstawionym schematycznie na rys. II-15. Załóżmy, że w piecu tym, opalonym węglem kamiennym i posiadającym ciąg naturalny, ciśnienie gazów przy wyjściu z jego komory roboczej jest równe zero.

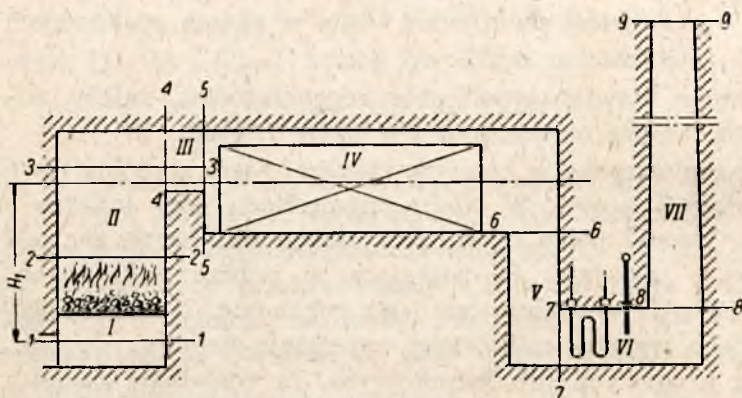
Aby obliczyć spadek ciśnienia w piecu, podzielimy drogę gazów (rys. II-15) płaszczyznami 1-1, 2-2 itd. na siedem odcinków. Ażeby gazy mogły przejść przez palenisko i komorę roboczą pieca aż do przekroju 6-6, gdzie panuje ciśnienie równe zeru, powinny one w palenisku posiadać ciśnienie $p_1 > 0$. Ciśnienie to uzyskuje się przez umieszczenie paleniska poniżej komory roboczej pieca o głębokość H_1 , wtedy

$$p_1 = H_1 (\gamma_p - \gamma_g) \quad \text{[II-52]}$$

gdzie γ_p i γ_g są to ciężary właściwe w kg/m^3 powietrza i gazów.

W celu obliczenia p_1 określa się spadki ciśnienia na odcinkach pieca przed przekrojem 6-6.

Na odcinku I między przekrojami 1-1 i 2-2 powietrze przechodzi przez ruszt i warstwę leżącego na nim paliwa. Spadek ciśnienia na tym od-



Rys. II-15. Schemat instalacji piecowej do obliczania spadku ciśnienia

czku Δp_1 obliczamy posługując się wzorami [II-50] i [II-51].

Na odcinku II między przekrojami 2-2 i 3-3 zachodzi spadek ciśnienia Δp_2 wskutek tarcia. Do obliczenia tego spadku służą wzory [II-27] i [II-31].

Na odcinku III przy przejściu gazów przez ścianę przewałową zachodzi zmiana kierunku przepływu (o 90°) oraz gwałtowne zwężenie przewodu, a następnie gwałtowne jego rozszerzenie. Spadek ciśnienia na tym odcinku wynosi Δp_3 , który obliczamy jako sumę spadków spowodowanych powyższymi przyczynami, każdą oddzielnie, czyli

$$\Delta p_3 = \Delta p_3' + \Delta p_3'' + \Delta p_3''' + \Delta p_3''''$$

gdzie: $\Delta p_3'$ — spadek ciśnienia wskutek zmiany kierunku przepływu gazów, obliczony na podstawie wzorów [II-14] i [II-38],

$\Delta p_3''$ — spadek ciśnienia wskutek gwałtownego zmniejszenia się przekroju, obliczony na podstawie wzorów [II-14] i [II-37],

$\Delta p_3'''$ — spadek ciśnienia wskutek tarcia na odcinku III, obliczony na podstawie wzoru [II-27],

$\Delta p_3''''$ — spadek ciśnienia wskutek gwałtownego powiększenia się przekroju, obliczony na podstawie wzorów [II-14] i [II-35].

Na odcinku IV zachodzi spadek ciśnienia Δp_4 wskutek oporu wsadu oraz wskutek tarcia. Najczęściej opór wsadu, jak wyjaśniono poprzednio, można pominąć, natomiast opór tarcia obliczamy na podstawie wzoru [II-27].

Sumując spadki ciśnienia na poszczególnych odcinkach instalacji przed przekrojem 6-6, otrzymamy ciśnienie p_1 , które powinny posiadać gazy przed rusztem. Wynosi ono

$$p_1 = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4$$

Po ustaleniu wielkości potrzebnego ciśnienia gazów na pokonanie oporów w piecu aż do wylotu z komory roboczej, gdzie ciśnienie równa się zeru ze wzoru [II-52] możemy obliczyć różnicę poziomów H_1 pomiędzy komorą roboczą pieca i paleniska.

Ponieważ u wylotu gazów z komory (tj. w przekroju 6-6) panuje ciśnienie równe zeru, dalszy ruch gazów w piecu zachodzi na skutek ssącego działania komina. Dla pokonania oporów na drodze gazów od przekroju 6-6 do wylotu komina należy wytworzyć dostateczną różnicę ciśnień (siłę ciągu) p_2 , budując komin o odpowiedniej wysokości.

W celu obliczenia siły ciągu p_2 określa się spadki ciśnienia na następujących odcinkach instalacji aż do wlotu gazów do komina.

Na odcinku V przy przejściu gazów z odcinka IV do V odbywa się gwałtowna zmiana kierunku (o 90°) i zwężenie przekroju, a poza tym gazy, które płyną z góry na dół, oprócz oporu tarcia muszą pokonać opór ciśnienia geometrycznego, którego wielkość oblicza się ze wzoru [II-10].

Biorąc to pod uwagę, możemy napisać, że spadek ciśnienia na odcinku V wynosi:

$$\Delta p_5 = \Delta p_5' + \Delta p_5'' + \Delta p_5''' + \Delta p_5''''$$

gdzie: $\Delta p_5'$ — spadek ciśnienia wskutek zmiany kierunku,

$\Delta p_5''$ — spadek ciśnienia wskutek zwężenia przekroju,

$\Delta p_5'''$ — spadek ciśnienia na pokonanie tarcia,

$\Delta p_5''''$ — spadek ciśnienia na pokonanie ciśnienia geometrycznego.

Na odcinku VI gazy przechodzą przez ogrzewacz i zasuwę kominową, a poza tym pokonują opory zmiany kierunku: a) przy przejściu z odcinka V do odcinka VI (o 90°) i b) przy przejściu z odcinka VI do odcinka

VII, czyli do komina (również o 90°). Spadek ciśnienia na odcinku VI wynosi

$$\Delta p_6 = 2 \Delta p_6' + \Delta p_6'' + \Delta p_6'''$$

gdzie: $\Delta p_6'$ — spadek ciśnienia wskutek zmiany kierunku,

$\Delta p_6''$ — spadek ciśnienia spowodowany rurkami ogrzewacza i obliczony na podstawie wzorów [II-42], [II-43] i [II-44],

$\Delta p_6'''$ — spadek ciśnienia spowodowany zasuwą i obliczony na podstawie wzoru [II-41].

Sumując spadki ciśnienia na poszczególnych odcinkach drogi gazów od wylotu z komory roboczej pieca (rys. II-15) aż do wlotu ich do kanału kominowego (przekrój 8-8), otrzymamy całkowity spadek ciśnienia gazów p_2 w drugiej części pieca

$$p_2 = \Delta p_5 + \Delta p_6$$

4. Urządzenia do wytwarzania ciągu. Kominy

Gazy uchodzą z pieców przez kominy, które spełniają przy tym dwójakie zadanie, a mianowicie — wytwarzają ciąg naturalny w piecu i odprowadzają gazy z pieca do atmosfery na dostateczną wysokość, aby nie były one szkodliwe dla roślin, zwierząt i ludzi.

Jeżeli komin ma należycie spełniać pierwsze swoje zadanie, to jego wysokość H powinna być taka, aby rozrzedzenie gazów wytwarzane u podstawy komina (tzn. na poziomie wlotu do niego spalin) było wystarczające do pokonania oporów, które spotykają gazy w instalacji piecowej i w kanale kominowym, oraz na nadanie im odpowiedniej prędkości (ciśnienia dynamicznego).

Oznaczając przez S rozrzedzenie gazów, wytwarzane przez komin w kG/m^2 , przez Δp — spadek ciśnienia na pokonanie oporów w piecu w kG/m^2 , obliczony w sposób podany w pktcie 3, rozdz. II, przez $\Delta p'$ — spadek ciśnienia wskutek tarcia w kominie i przez p_d — ciśnienie dynamiczne gazów u wylotu komina otrzymamy

$$S = \Delta p + \Delta p' + p_d$$

Biorąc pod uwagę, że rozrzedzenie S wytwarzane przez komin o wysokości H równa się ciśnieniu geometrycznemu słupa gorących gazów o tej samej wysokości, na podstawie wzoru [II-10] możemy napisać, że

$$S = p_{geom} = 273 H \left(\frac{\gamma_{op}}{T_{pow}} - \frac{\gamma_{og}}{T_g} \right) = \Delta p + \Delta p' + p_d \quad \text{[II-53]}$$

Ciężar właściwy γ_{op} suchego powietrza w warunkach normalnych, tj. pod ciśnieniem 760 mm Hg i w temp. 0°C, wynosi 1,293 kG/m^3 . Wobec tego, że powietrze atmosferyczne zawsze jest wilgotne i jest pod

ciśnieniem barometrycznym wynoszącym B mm Hg, które zwykle nie równa się ciśnieniu normalnemu, ciężar właściwy powietrza atmosferycznego w temperaturze t_p °C równa się

$$\gamma_p = 1,293 \frac{273}{273 + t_p} \cdot \frac{B}{760} - 0,176 \varphi \frac{p_n}{273 + t_p} \quad [\text{II-54}]$$

gdzie: φ — wilgotność względna powietrza atmosferycznego,

p_n — prężność pary nasyconej w temperaturze t_p w mm Hg.

Ciężar właściwy gazów spalinowych γ_{og} zależy od ich składu. Zwykle jest on większy od ciężaru właściwego suchego powietrza o 2 lub 3%. Biorąc pod uwagę, że powyższa różnica jest stosunkowo mała, wobec tego dla uproszczenia wzorów często przyjmuje się

$$\gamma_{og} = \gamma_{op} = 1,293 \text{ kG/m}^3 \quad [\text{II-54a}]$$

Spadek ciśnienia wskutek tarcia gazów w kominie wynosi

$$\Delta p' = \lambda \frac{H}{d_{sr}} \cdot \gamma_g \cdot \frac{w^2}{2g} = \lambda \cdot \frac{H}{d_{sr}} \cdot \gamma_0 \cdot \frac{w_0^2}{2g} \cdot \frac{273 + t_g}{273} \cdot \frac{B}{760} \quad [\text{II-55}]$$

gdzie d_{sr} oznacza średnicę wewnętrzną kominą w m.

Uwzględniając wzory [II-54], [II-54a], [II-55] i [II-9], równanie [II-53] można przekształcić w sposób następujący:

$$\begin{aligned} & H \cdot 1,293 \left(\frac{273}{273 + t_p} - \frac{273}{273 + t_g} \right) \frac{B}{760} - 0,176 \varphi \frac{p_n}{273 + t_p} = \\ & = \Delta_p + \lambda \frac{H}{d_{sr}} \cdot 1,293 \frac{w_0^2}{2g} \cdot \frac{273 + t_g}{273} \cdot \frac{B}{760} + 1,293 \frac{w_0^2}{2g} \cdot \frac{273 + t_g}{273} \cdot \frac{B}{760} \end{aligned}$$

z którego otrzymamy

$$\begin{aligned} & H \cdot 1,293 \left(\frac{273}{273 + t_p} - \frac{273}{273 + t_g} - \frac{\lambda}{d_{sr}} \cdot \frac{w_0^2}{2g} \cdot \frac{273 + t_g}{273} \right) \frac{B}{760} = \\ & = \Delta_p + 0,176 \varphi \frac{p_n}{273 + t_g} + 1,293 \cdot \frac{w_0^2}{2g} \cdot \frac{273 + t_g}{273} \cdot \frac{B}{760} \quad [\text{II-56}] \end{aligned}$$

Równanie [II-56] stosuje się do obliczania wysokości H kominą, potrzebnej do wytwarzania ciągu naturalnego, wystarczającego do pokonywania oporów w piecu.

Obliczanie wysokości kominą z równania [II-56] prowadzi się przy założeniu, że temperatura t_p powietrza atmosferycznego i jego wilgotność φ są równe średniej temperaturze dziennej i średniej wilgotności miesiąca lipca, a ciśnienie barometryczne B — średniemu ciśnieniu barometrycznemu miejscowości, w której przewiduje się wybudowanie kominą. Biorąc pod uwagę, że gazy spalinowe w kominie oziębiają się, temperaturę tę przyjmuje się za równą ich średniej temperaturze w kominie.

Przy średniej temperaturze gazów w kominie, wynoszącej od 200 do 300°C, spadek temperatury Δt na 1 m wysokości komina oblicza się ze wzoru

$$\Delta t = \frac{A}{\sqrt{D}} \text{ } ^\circ\text{C/m}$$

gdzie: D — zewnętrzna średnica komina,

A — współczynnik wynoszący 0,2 dla kominów murowanych o grubości ścianki powyżej 1 m, przy grubości mniejszej od 0,5 m współczynnik ten równa się 0,4 a dla kominów stalowych jest równy 2.

Średnią temperaturę gazów wchodzących do komina oblicza się na podstawie bilansu cieplnego instalacji, którą obsługuje komin, albo przy obliczaniu wysokości komina przyjmuje się, że wynosi ona 180 do 200°C.

Przekrój wylotowy kanału kominowego (rys. II-16), a więc i jego średnicę d oblicza się ze wzoru

$$\frac{\pi d^2}{4} = \frac{V_{\max}}{3600 \cdot w_g} \quad \text{[II-57]}$$

gdzie V_{\max} oznacza maksymalną objętość gazów w m^3 , przepływających przez komin w ciągu 1 godz. Objętość V_{\max} oblicza się zwykle z bilansu materiałowego pieca. Jeżeli gazy kominowe są tylko produktami spalania paliwa stałego lub ciekłego, tj. jeżeli ogrzewane w piecu materiały i wyroby nie wydzielają gazowych produktów reakcji, to V_{\max} można obliczyć z następującego wzoru:

$$V_{\max} = G \cdot v \cdot \frac{273 + t_g}{273} \cdot \frac{760}{B} \quad \text{[II-58]}$$

gdzie: G — maksymalna ilość paliwa spalanego w piecu w ciągu 1 godz w kg/godz ,

v — objętość gazów spalinowych, powstających wskutek spalania 1 kg paliwa, w m^3/kg .

Prędkość gazów w_g przy wylocie z komina nie powinna być mniejsza niż 3 m/sek nawet przy najmniejszym obciążeniu pieca, ponieważ przy ciągu naturalnym i prędkości $w_g < 2,5 \text{ m/sek}$ gazy nie wypełniają całkowicie przekroju poprzecznego komina, wskutek czego w przypadku wiatru skierowanego pod kątem do poziomu, do komina trafia powietrze, wywołując zaburzenia w jego ciągu. Największa prędkość gazów w kominie przy ciągu naturalnym nie powinna przekraczać 10 m/sek , a przy ciągu sztucznym 18–20 m/sek .

Dla zabezpieczenia roślin, zwierząt i ludzi od szkodliwego działania gazów spalinowych wysokość komina nie powinna być niższa od 16 m. Jeżeli trujące lub o nieprzyjemnym zapachu substancje gazowe są usuwane przez komin do atmosfery, to wysokość jego powinna być w tym przypadku kilkakrotnie większa.

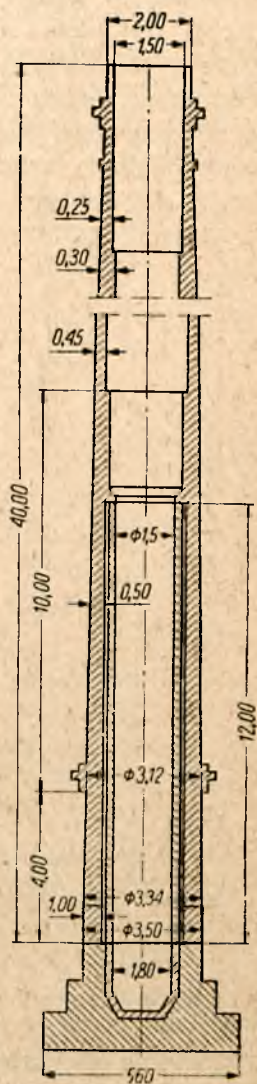
Kominy bywają murowane, żelbetowe i stalowe. Kominy murowane są kosztowne, ale trwałe, nie wymagają częstych napraw i stosunkowo niewiele oziębiają gazy spalinowe. Kominy stalowe są tanie, lekkie, lecz nietrwałe, poza tym bardziej oziębiają gazy spalinowe niż kominy murowane, co wpływa ujemnie na ciąg. Kominy żelbetowe pod wieloma względami zajmują pozycję pośrednią.

Kominy murowane są wykonywane ze specjalnej dziurkowanej cegły kominowej. Ze względów statycznych komin ma kształt stożka ściętego (rys. II-16) o kącie wierzchołkowym (czyli kącie między tworzącymi) wynoszącym od 2 do 3°, postawionego na cokole i ozdobionego u góry główką.

Dla uzyskania kształtu stożkowego oraz ze względów statycznych i oszczędnościowych grubość ściany kominu w czasie jego murowania ulega zmniejszaniu od wewnątrz o 5 cm (w odstępach od 4 do 6 m), tak aby u wylotu kominu wynosiła od 20 do 30 cm. Dolną część kanału kominowego zwykle wyklada się od wewnątrz cegłą ogniotrwałą z pozostawieniem niewielkiego luzu pomiędzy wyłożeniem i ścianą kominu z cegły zwykłej.

Na komin działa parcie wiatru, które w obliczeniach statycznych przyjmuje się za równe 100 kG/m² na wysokości do 15 m, licząc od poziomu ziemi, 125 kG/m² na wysokości od 15 do 25 m i 150 kG/m² powyżej 25 m. Pod wpływem tego parcia w kominie powstają naprężenia rozrywające od strony wiatru i naprężenia ściskające po stronie przeciwnej oraz naprężenia ścinające. Naprężenia ściskające i rozrywające, wywołane parciem wiatru, sumują się z naprężeniami, które powstają pod działaniem siły ciężkości górnych części kominu. Oczywiście, naprężenia wypadkowe nie powinny przekraczać naprężeń dopuszczalnych. Szczególnie niebezpieczne są naprężenia rozrywające, ponieważ na ogół zaprawa murarska słabo przylega do cegieł. Z tego powodu naprężenia rozrywające większe od 1 kG/cm² dopuszcza się w kominach tylko w wyjątkowych przypadkach.

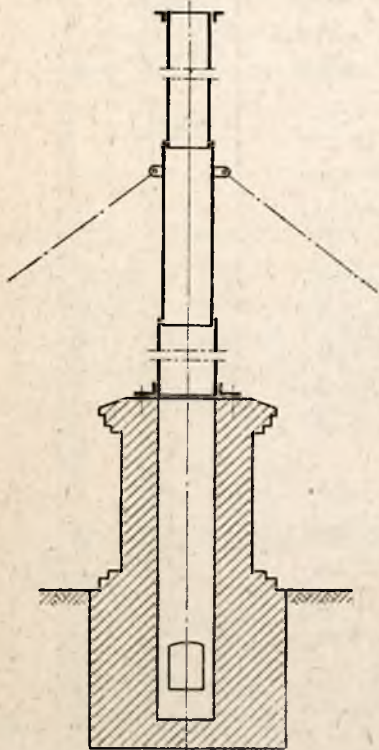
Kominów murowanych ze względu na duży ich ciężar nie można wiązać konstrukcyjnie z piecami i ścianami budynków fabrycznych.



Rys. II-16. Komin murowany

Zwykle buduje się je poza budynkiem jako wolno stojące na własnym mocnym fundamencie, który w celu równomiernego rozłożenia ciśnienia na grunt rozszerza się stopniowo ku dołowi.

Kominy stalowe (rys. II-17) wykonuje się z blachy o grubości od 5 do 8 mm w dolnej części i od 3 do 4 mm w części górnej. Grubość blachy wyznacza się nie ze względów wytrzymałościowych, lecz ze względu na korozję, ponieważ cienkie ściany komina szybciej ulegają zniszczeniu wskutek chemicznego działania gazów kominowych. Z blachy są wykonywane odcinki komina o coraz mniejszej średnicy, tak aby górny odcinek wchodził w dolny (jak w rurze teleskopowej). Odcinki te łączy się ze sobą przez spawanie lub nitowanie



Rys. II-17. Komin stalowy

W dolnej części komina stalowego znajduje się płyta żeliwna (rzadziej stalowa), która służy do przymocowania go do murowanego cokołu za pomocą śrub fundamentowych. Aby zabezpieczyć kominy przed przewróceniem się pod wpływem silnego wiatru, stosuje się liny stalowe, których górne końce łączy się z kominem na ok. $\frac{3}{5}$ jego wysokości, a dolne przymocowuje się do wkopanych w ziemię zaczepów (kotwic). W celu zabezpieczenia komina stalowego przed opadami atmosferycznymi ustawia się niekiedy nad nim daszek.

Ciąg sztuczny uzyskuje się za pomocą wentylatorów, ekshaustorów i inżektorów. Inżektory stosowane są zarówno do tłoczenia powietrza do pieca pod ciśnieniem, jak i do odprowadzania z instalacji gazów spalinowych przez wytworzenie odpowiedniego rozrzedzenia w kominie.

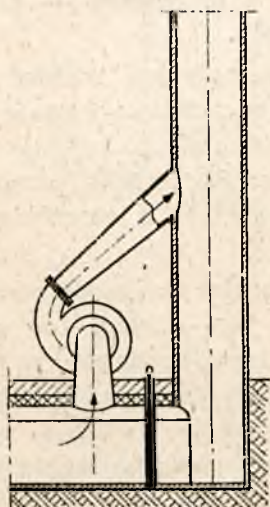
Tłoczenie za pomocą wentylatorów stosuje się częściej. Duży jednak opór niektórych instalacji piecowych wywołuje konieczność stosowania w tych przypadkach dość dużych ciśnień, co wskutek nadciśnienia w piecu powoduje wydzielanie się gazów spalinowych poprzez nieszczelności obmurza.

Odsysanie gazów z instalacji piecowej za pomocą wentylatorów i ekshaustorów wytwarza w piecu próżnię, co powoduje niepożądane zasyssanie zimnego powietrza do pieca poprzez nieszczelności obmurza zewnętrznego.

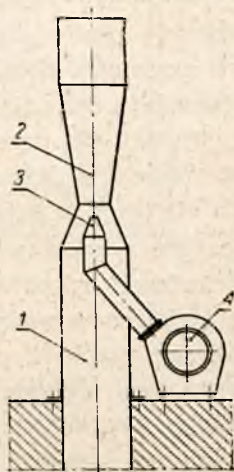
Jednoczesne stosowanie tłoczenia powietrza do pieca i wysysanie z niego gazów spalinowych nazywa się ciągiem zrównoważonym, który pozwala na utrzymywanie w jednej części pieca umiarkowanego nadciśnienia, a w części drugiej — niewielkiego podciśnienia (rozrzedzenia) i na uniknięcie nadmiernego wydzielania się gazów z pieca przez nie szczelności obmurza lub nadmiernego zasysania powietrza.

Często w piecach stosowane są jednocześnie ciąg naturalny i ciąg sztuczny przez tłoczenie za pomocą wentylatorów paliwa gazowego i powietrza oraz odprowadzanie spalin przez komin. Ciąg kominowy wzmacnia się często ciągiem sztucznym.

Ciąg sztuczny wytwarzany przez wentylatory i ekshaustory bywa bezpośredni i pośredni. Schemat instalacji do wytwarzania bezpośred-



Rys. II-18. Schemat instalacji do wytwarzania bezpośredniego ciągu sztucznego



Rys. II-19. Schemat instalacji do wytwarzania pośredniego ciągu sztucznego: 1 — dopływ spalin, 2 — dyfuzor kolumny, 3 — dysza powietrzna, 4 — wentylator

nego ciągu sztucznego jest przedstawiony na rys. II-18. Gazy spalinowe są zasysane z pieca przez wentylator i tłoczone do kolumny. Gdy temperatura gazów jest wysoka (powyżej 200—250°C), łożyska wentylatora, a czasami również i jego wał trzeba chłodzić wodą.

Schemat instalacji do wytwarzania sztucznego ciągu pośredniego przedstawiono na rys. II-19. Wentylator w tym przypadku zasysa zimne powietrze albo część gazów spalinowych i tłoczy je poprzez dyszę do wnętrza zwężonej części stalowego kolumny, wskutek czego zachodzi zasysanie gazów z instalacji piecowej do kolumny.

5. Ruch gazów w komorze roboczej i w innych częściach pieca

Ruch gazów w dowolnym kanale o ściankach szczelnych (np. metalowych) nie zależy, jak wiadomo, od tego, czy zachodzi on na skutek tłoczenia gazów przez wentylator utrzymujący na początku kanału nadciśnienie $+ p$ kG/m², czy na skutek ssania przez ekshaustor ustawiony na końcu kanału i utrzymujący tam podciśnienie (rozrzedzenie) tej samej wielkości $- p$ kG/m². Ilość gazów przepływających przez kanał, ich prędkość i charakter ruchu (laminarny lub burzliwy) będą w obu przypadkach jednakowe; różnica polega tylko na tym, że w przypadku pierwszym ciśnienie w kanale będzie większe, a w drugim — mniejsze od ciśnienia atmosferycznego. Jeżeli natomiast ścianki kanału będą porowate, to zarówno ilość gazów, jak i charakter ich ruchu nie będą jednakowe, ponieważ w pierwszym przypadku gazy będą przez nieszczelności ścian przedostawać się na zewnątrz, a w drugim — powietrze z zewnątrz będzie zasysane do wnętrza kanału.

Dla prawidłowej pracy pieców duże znaczenie ma rozkład ciśnień w różnych ich częściach. Ściany pieców są najczęściej porowate, a poza tym zwykle posiadają dużą liczbę otworów, jak okna do ładowania i wyładowywania, otwory do przepychania, wzierniki itp., za pomocą których komora robocza i kanały pieców łączą się z otoczeniem, gdy drzwiczki tych otworów są otwarte.

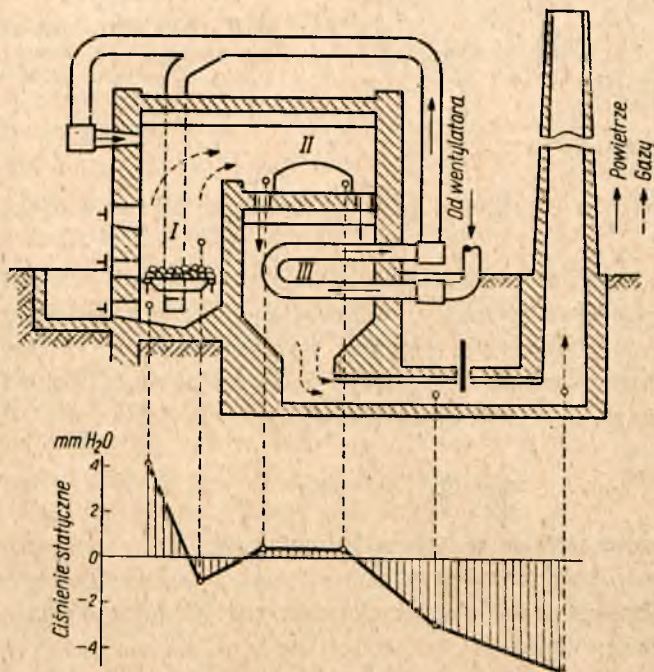
Aby z pieca nie wydostawały się na zewnątrz gazy spalinowe przy otwieraniu drzwiczek piecowych w czasie jego obsługi lub aby nie dostawało się do pieca w nadmiernej ilości zimne powietrze, w komorze roboczej pieca, jak już było poprzednio zaznaczone, na poziomie trzonu (dna komory) należy utrzymywać ciśnienie równe ciśnieniu atmosferycznemu. Z tego powodu w przypadku pracy pieca na węglu kamiennym, koksie lub na innym stałym paliwie należy przy projektowaniu i budowie instalacji piecowej przewidywać ruch gorących gazów spalinowych z paleniska do komory roboczej pieca albo na skutek parcia słupa gorących gazów w palenisku i w kanałach doprowadzających, albo też pod wpływem wentylatora tłoczącego powietrze pod ruszt z pewnym nadciśnieniem. Nadciśnienie to powinno wystarczyć na pokonanie oporów przy przepływie powietrza przez ruszt i warstwę leżącego na nim paliwa oraz na pokonanie oporów ruchu gazów spalinowych na drodze od paleniska do komory roboczej.

W piecach tego rodzaju otwory, którymi wchodzi gazy z paleniska do komory roboczej, są zwykle dużych rozmiarów, wskutek czego ruch gazów w komorze jest stosunkowo spokojny. Opór komory roboczej jest najczęściej bardzo mały, nietrudno więc na całej długości trzonu pieca (dna komory) uzyskać w przybliżeniu jednakowe, zbliżone do zera ciśnienie. Komin lub wentylator ssący (ekshaustor) wytwarzają w tych przy-

padkach rozrzedzenie potrzebne tylko do pokonywania oporów w kanałach pieca między komorą i wylotem komina.

Na rys. II-20 przedstawiono dla przykładu rozkład ciśnień w jednym z pieców przemysłowych. W powyższym piecu ruch powietrza i gazów na drodze od popielnika do komory roboczej odbywa się na skutek nadciśnienia wytwarzanego przez wentylator, a następnie od komory roboczej do komina — wskutek rozrzedzenia wytwarzanego przez komin.

Opory przepływu gazów przez palenisko, komorę roboczą i kanały pieca można łatwo obliczyć, posługując się wzorami podanymi i omówionymi w pktcie 4 tego rozdziału, wskutek czego ustalenie rozkładu

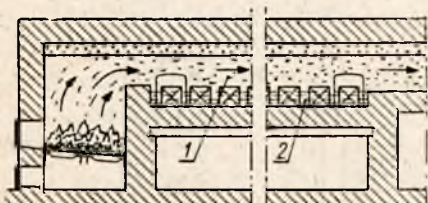


Rys. II-20. Rozkład ciśnień w piecu przemysłowym

ciśnień w piecu ze spokojnym ruchem gazów zbliżonym do naturalnego nie jest trudne.

Przy obliczaniu i projektowaniu pieca z naturalnym ruchem gazów należy pamiętać, ażeby komora robocza i poziome kanały były całkowicie wypełnione gorącymi gazami. W przeciwnym przypadku gazy spalinowe o wysokiej temperaturze będą płynąć pod sklepieniem kanałów, podobnie jak woda płynie na dnie rynny niecałkowicie nią zapełnionej. Powstają wtedy na dnie kanałów prawie nieruchome (martwe) warstwy zimniejszych gazów, które tylko wyjątkowo, np. w dolnym kanale kotła dwupłomienicowego (rys. II-1), można traktować jako pożyteczną warstwę izolacyjną. Inaczej się to przedstawia, gdy kanał poziomy jest komorą roboczą pieca do ogrzewania lub wypalania różnego

rodzaju materiałów (rys. II-21). Przedmioty poddawane termicznej obróbce w piecach tego rodzaju leżą na dnie komory roboczej w warstwie zimniejszych, prawie nieruchomych gazów, natomiast górą odpływają do komina gazy niedostatecznie ostudzone, a więc gorące. Oczywiście, zużycie paliwa w takich piecach jest bardzo duże, pomimo że obrabiane w nim materiały nie zawsze bywają należycie wyżarzone. Ażeby uniknąć takiego szkodliwego dla prawidłowej pracy pieca rozwarstwienia gazów w komorze roboczej, ewentualnie w kanałach, należy tak dobrać wy-



Rys. II-21. Schemat pieca do ogrzewania bloków stalowych: 1 — gazy gorące, 2 — gazy zimne

sokość komory, aby płomień sięgał jej dna, nie pozostawiając przestrzeni martwych.

Powyższym zagadnieniem zajmował się prof. Józef Jeśman na prośbę prof. W. E. Grum-Grzymajły. Opierając się na zasadzie Boussinesqa o maksymalnym przepływie płynów wyprowadził on następujący wzór na dopuszczalną wysokość h komory, przez którą w kierunku poziomym przepływają gazy o wysokiej temperaturze:

$$h \leq A \sqrt{\frac{V^2}{b^2 \cdot t}} \text{ m} \quad ^1) \quad \text{[II-59]}$$

gdzie: t — temperatura gazów w komorze w $^{\circ}\text{C}$,

b — szerokość komory w m,

V — objętość gazów w temperaturze $t^{\circ}\text{C}$, przepływających przez komorę w m^3/sek ,

A — współczynnik zależny od wysokości h i długości L komory.

Wartości współczynnika A jako funkcji h i L , obliczone przez prof. J. Jeśmana, są podane w tabl. II-7.

Nadając komorze roboczej pieca przedstawionego na rys. II-21 wysokość obliczoną ze wzoru [II-59], uzyskuje się pewność, że przy naturalnym ruchu gazów nie będzie się tworzyć na dnie komory roboczej pieca nieruchoma warstwa zimniejszych gazów.

Tablica II-7
WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA A

Lm	0,5	1,2	2,0	5	> 5
hm					
0,3	3,20	3,41	3,52	3,62	3,67
0,4	3,07	3,34	3,51	3,61	3,69
0,5	2,95	3,27	3,48	3,59	3,69
0,6	2,75	3,20	3,45	3,58	3,69
0,75	2,71	3,06	3,36	3,56	3,69
1,00	2,43	2,95	3,28	3,52	3,70

¹⁾ Wyprowadzenie wzoru J. Jeśmana [II-59] podaje prof. Cz. Grabowski w pracy pt. Zasady hydraulicznej teorii ciągu naturalnego (Technika Ciepła, 1929—1932) oraz prof. W. E. Grum-Grzymajło w pracy pt.: Płamiennye piecy. M-L 1932.

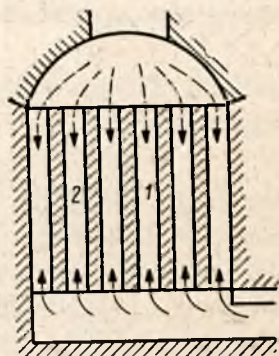
Słuszność wzoru [II-59] prof. J. Jeśmana została doświadczalnie stwierdzona. Prof. W. E. Grum-Grzymajło zebrał dane w szeregu fabryk i stwierdził, że piece, których wysokość była mniejsza od wysokości obliczonej ze wzoru J. Jeśmana, pracowały dobrze, natomiast piece, których wysokość była większa, zużywały zbyt wiele paliwa i dawały wyroby niedostatecznie wypalone lub wyżarzone.

Ruch gazów w pionowych kanałach pieców powinien mieć kierunek naturalny. Jeżeli wskutek procesów zachodzących w piecu (np. wskutek oziębiania się), ciężar właściwy gazów wzrasta, to kierunkiem naturalnym ruchu jest kierunek z góry w dół, a w przeciwnym razie, gdy ciężar właściwy gazów w piecu maleje (np. wskutek ogrzewania się), naturalny ich kierunek jest z dołu do góry.

Przez nadanie gazom przy projektowaniu pieców kierunku naturalnego zmniejsza się opory przepływu i zapewnia bardziej prawidłową pracę pieców. Załóżmy na przykład, że przez pionowe kanały regeneratora (rys. II-22) płyną do góry gazy o temperaturze znacznie niższej niż temperatura ścian kanałów, wskutek czego gazy płynące przez kanały, ogrzewają się. Jeżeli z jakiegoś powodu w jednym z kanałów (np. w kanale 1) gaz zacznie płynąć wolniej niż w kanałach pozostałych, to strumień gazu w tym kanale, stykając się z gorącymi jego ściankami dłużej niż strumienie gazu w innych kanałach, będzie się ogrzewać do wyższej temperatury, wskutek czego ciśnienie geometryczne gazu w tym kanale zgodnie z równaniem [II-10] będzie wzrastać i wpływać przyspieszająco na ruch strumienia w tym kanale dopóty, dopóki nie nastąpi wyrównanie prędkości.

Jeżeli przez kanały regeneratora (rys. II-22) płyną ogrzewające się gazy w kierunku nienaturalnym, czyli z góry w dół, to w przypadku zwiększenia się ich prędkości przepływu w jednym z kanałów (np. w kanale 2) gazy w tym kanale będą się ogrzewać do niższej temperatury niż w innych kanałach, ponieważ krócej będą się stykać z gorącymi jego ściankami. Wskutek tego będą one cięższe, co wpłynie na zwiększenie prędkości ich ruchu w tym kanale. W rezultacie nastąpi szybszy ruch gazów w jednych kanałach, a wolniejszy w innych, przez co temperatura ścian w poszczególnych kanałach nie będzie utrzymywać się na jednakowej wysokości.

Zupełnie analogiczne zjawiska zachodzą, gdy pionowymi kanałami płyną gazy, których temperatura obniża się. I w tym przypadku przy naturalnym kierunku przepływu, tj. z góry w dół, zachodzi samoregu-

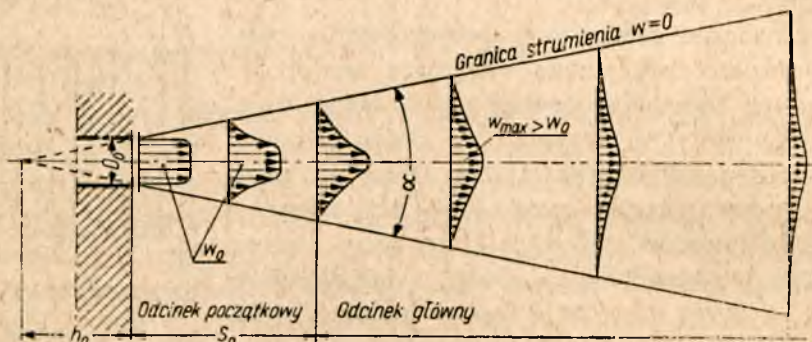


Rys. II-22. Schemat ruchu gazów w kanałach pionowych

lacja równomierności ruchu gazów w poszczególnych kanałach, jeżeli z jakiegoś powodu równomierność przepływu została naruszona. Natomiast przy kierunku nienaturalnym (z dołu do góry) prędkość gazów w poszczególnych kanałach może nie być jednakowa.

Ruch gazów w kierunku naturalnym lub nienaturalnym nie ma istotnego znaczenia w przypadku, gdy opór kanałów jest bardzo duży w porównaniu z dodatkowym ciśnieniem geometrycznym, które w nich powstaje na skutek niejednakowych temperatur gazów. Gdy pionowe kanały stawiają duże opory przepływającym gazom, należy je pokonywać przy pomocy ciągu sztucznego.

Jak wynika z powyższego, przestrzeganie kierunków naturalnych ruchu gazów w piecach pracujących przy ciągu naturalnym, w których



Rys. II-23. Schemat strumienia swobodnego

opory pionowych kanałów (w regeneratorach i rekuperatorach) zużywają znaczną część wytwarzanego przez komin rozrzedzenia, jest bardzo ważne.

W piecach ogrzewanych pyłem węglowym, paliwem gazowym lub ciekłym gazem z dużą prędkością doprowadzane są do komory roboczej pieca z odpowiednich palników o przekroju okrągłym lub prostokątnym. Jeżeli strumień palących się gazów ma stosunkowo małe wymiary w porównaniu z wymiarami komory roboczej, można go traktować jako strumień swobodny.

Swobodnym strumieniem nazywa się taki strumień gazów lub cieczy, który nie jest ograniczony ścianami i z pewną prędkością wydostaje się ze stosunkowo niewielkiego otworu do dużej przestrzeni wypełnionej podobnym, lecz nieruchomym płynem.

Liczne badania wykazały, że prędkość strumienia gazów wylatujących z paleniska lub dyszy (rys. II-23) zmniejsza się w miarę oddalania się tego strumienia od miejsca wypływu wskutek tarcia pomiędzy strumieniem i otaczającym go środowiskiem. W związku z tym zwiększa się powierzchnia przekroju poprzecznego strumienia. Jeżeli strumień

wypływa z otworu okrągłego, to kształt przekroju pozostaje bez zmiany, natomiast strumienie wypływające z otworów prostokątnych przybierają w pewnej odległości od miejsca wypływu kształt okrągły. Powiększenie wymiarów poprzecznych strumienia jest w przybliżeniu proporcjonalne do odległości rozpatrywanego przekroju od miejsca wypływu.

W obszarze zetknięcia się strumienia z nieruchomym ośrodkiem powstają wiry, które przedostają się zarówno w głąb strumienia, jak i do ośrodka otaczającego strumień. Cząsteczki gazu przenoszone przez wiry w głąb strumienia hamują jego prędkość, przyczyniając się do powstawania w nim ruchu burzliwego. Natomiast wiry przenikające do najbliższych warstw ośrodka przenoszą do nich porywane przez siebie cząsteczki strumienia.

W ten sposób następuje mieszanie się gazów stanowiących ośrodek z gazami tworzącymi strumień. Masa poruszających się gazów wzrasta w miarę oddalania się od otworu, z którego wypływa strumień.

Na rys. II-23 przedstawiono schemat swobodnego strumienia. Prędkość tego strumienia w_{max} , mierzona na jego osi (tzw. prędkość osiowa), jest stała na początkowym odcinku strumienia i równa się prędkości w_0 , z jaką strumień wypływa z dyszy. Prędkość zaś na granicznym obwodzie strumienia zmniejsza się bezpośrednio po wyjściu jego z dyszy wskutek tarcia i wymiany masy pomiędzy strumieniem i otaczającym go ośrodkiem.

W pewnej odległości od dyszy wiry, wywołujące mieszanie się gazów, dochodzą do osi strumienia, wskutek czego zaczyna się zmniejszać jego prędkość osiowa. W tym miejscu kończy się odcinek początkowy strumienia i rozpoczyna się odcinek główny. Koniec głównego odcinka znajduje się w tym miejscu, gdzie strumień zanika, tj. tam, gdzie jego prędkość osiowa staje się równa zeru.

Kształt strumienia, jak wynika z powyższego, jest stożkowy. Wierzchołek stożka nazywa się biegunem strumienia. Kąt wierzchołkowy strumienia α wynosi od 18 do 26° . Liczne badania wykazały, że zwiększenie początkowej prędkości strumienia w_0 nie zmienia jego kształtu, natomiast prędkości we wszystkich punktach strumienia zwiększają się proporcjonalnie do wzrostu prędkości początkowej. Zmiana średnicy dyszy lub otworu, z którego uchodzi gaz, tworzy strumień podobny. Z tego powodu prędkości w odpowiadających sobie punktach strumienia, wyrażone w jednostkach bezwymiarowych, są jednakowe i niezależne od średnicy dyszy lub otworu, z których wypływają strumienie, oraz niezależne od ich prędkości początkowych.

Ciśnienie panujące w strumieniu, jak wykazały badania, we wszystkich jego punktach jest jednakowe i prawie równe ciśnieniu otaczają-

cego ośrodka, w którym płynie strumień. Ilość ruchu I we wszystkich przekrojach strumienia jest również jednakowa, można więc napisać

$$dI = dm \cdot w = \frac{\gamma}{g} \cdot dF \cdot w^2 = 0$$

oraz

$$I = \frac{\gamma}{g} \int w^2 dF = \text{const} \quad \text{[II-60]}$$

gdzie: m — masa gazu przepływającego przez dowolny przekrój poprzeczny strumienia w ciągu jednej sekundy w kg,

F — powierzchnia przekroju poprzecznego strumienia w m^2 .

Badaniem strumieni wypływających z palników i dysz zajmowało się wielu badaczy. Między innymi szczegółowe badania swobodnych strumieni o przekroju okrągłym i płaskim przeprowadził G. Abramowicz. Wyniki swoich badań przedstawił on w postaci wzorów empirycznych, które nadają się do obliczeń technicznych. Wzory powyższe oraz obliczenia wykonane na ich podstawie podane są w tabl. II-8.

Tablica II-8

WZORY DO OBLICZEŃ SWOBODNEGO STRUMIENIA

	Strumień okrągły				Strumień płaski	
	Wzór obliczeniowy	Dysza			Wzór obliczeniowy	Wartości średnie
		zweżająca	cylin-drycz-na	roz-szerza-jąca		
Współczynnik strumienia	a	0,066	0,072	0,080	a	0,09—0,12
Głębokość bieguna	$\frac{h_0}{D_0} = \frac{0,145}{a}$	2,20	2,02	1,82	$\frac{h_0}{b_0} = \frac{2,05}{a}$	2,27—1,71
Długość odcinka początkowego	$\frac{S_0}{D_0} = \frac{0,335}{a}$	5,08	4,65	4,19	$\frac{S_0}{b_0} = \frac{0,515}{a}$	55,72—4,29
Tangens kąta $\frac{\alpha}{2}$	$\text{tg } \frac{\alpha}{2} = 3,4 a$	0,225	0,245	0,272	$\text{tg } \frac{\alpha}{2} = 2,4 a$	0,216—0,288
Kąt $\frac{\alpha}{2}$	$\frac{\alpha}{2} = \text{arctg } 3,4 a$	12° 40'	13° 45'	15° 15'	$\frac{\alpha}{2} = \text{arctg } 2,4 a$	2° 10'—16° 05'
Prędkość osiowa na odcinku początkowym	$\frac{w_1}{w_0} = 1 = \text{const}$	1	1	1	$\frac{w_1}{w_0} = 1 = \text{const}$	1
Prędkość osiowa na odcinku głównym	$\frac{w_1}{w_0} = \frac{0,048}{a S_0 + x} \cdot \frac{1}{D_0} + 0,145$	—	—	—	$\frac{w_1}{w_0} = \frac{0,057}{\sqrt{\frac{a S_0 + x}{b_0} + 0,215}}$	—

Ustalone przez G. Abramowicza wzory (tabl. II-8) można stosować do obliczeń z dostateczną dokładnością do celów technicznych tylko wtedy, gdy strumień może być traktowany jako strumień swobodny. W komorach ciasnych, których wymiary nie są bardzo duże w porównaniu z wymiarami strumieni, powyższych wzorów nie można stosować, ponieważ w tych przypadkach strumienie nie są swobodne.

Wtedy ruch gazów w piecu i zachowanie się strumieni palących się gazów w komorze roboczej bada się na modelach zbudowanych zgodnie z wymaganiami teorii modelowania albo, jeżeli to możliwe, bezpośrednio w samym piecu. Na modelach przeprowadza się również badania ruchu gazów stanowiących ośrodek otaczający strumień w komorze roboczej, ponieważ ruchu ich w sposób teoretyczny nie można ani ustalić, ani tym bardziej obliczyć.

Wypływ gazów przez otwory w ścianach pieców. Ściany komory roboczej pieca posiadają różnego rodzaju otwory, jak okna załadownicze i wyładownicze, otwory wizerne i przepychowe itp. Ponieważ na poziomie trzonu komory roboczej utrzymuje się zwykle, jak już było poprzednio wyjaśnione, ciśnienie równe zeru, powyżej trzonu panuje ciśnienie większe od ciśnienia powietrza na tym samym poziomie na zewnątrz pieca, jak to wynika ze wzoru [II-6]. Z tego powodu, gdy otwory te są otwarte, z pieca uchodzą gorące gazy.

Jeżeli otwory znajdują się na poziomie trzonu komory roboczej, jak np. okna załadownicze, to objętość V_{sek} wypływających przez nie gazów można obliczyć z następującego wzoru J. Jeśmana na wydatek przelewu gazowego (rys. II-26)

$$V_{sek} = 1,37 \cdot BH \cdot \sqrt{\frac{H T_g}{T_g}} \text{ m}^3/\text{sek} \quad [\text{II-61}]$$

gdzie: B — szerokość otworu w m (rys. II-26),

H — wysokość otworu w m.

Jeżeli otwór znajduje się powyżej trzonu pieca, np. pod sklepieniem lub w sklepieniu, to gazy uchodzą na zewnątrz w taki sam sposób jak wypływają ciecze przez otwory w ścianach i dnie naczyń, w których się znajdują. I w tym przypadku zachodzi przewężenie strumienia wypływających gazów, jeżeli grubość l ściany lub sklepienia jest dostatecznie mała w porównaniu ze średnicą d otworu ($l < 4d$), podobnie jak zwięża się strumień cieczy wypływającej przez otwory w ścianach naczyń cienkościennych.

Jeżeli różnica ciśnień w piecu i na zewnątrz niego na poziomie osi otworu równa się Δp , to prędkość wypływu można obliczyć ze znanego z mechaniki płynów wzoru

$$w = \varphi \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta p}{\gamma g}} \text{ m/sek} \quad [\text{II-62}]$$

a ilość wypływających gazów, czyli wydatek strumienia V_{sek} równa się

$$V_{sek} = \mu \cdot f \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta p}{\gamma}} \text{ m}^3/\text{sek} \quad [\text{II-63}]$$

gdzie: μ — współczynnik wydatku,

f — powierzchnia otworu w m^2 .

Dla otworów w cienkich ścianach $\mu = 0,62$, a w ścianach grubych ($l > 4d$) $\mu = 0,82$.

WYKORZYSTANIE CIEPŁA W PIECU

1. Wstęp

Ciepło, które się wydziela przy spalaniu paliwa, jest wykorzystywane w sposób użyteczny do ogrzewania obrabianych w komorze roboczej pieca materiałów.

Wymiana ciepła pomiędzy ciałami albo różnymi punktami tego samego ciała wymaga, jak wiadomo, istnienia różnicy temperatur pomiędzy nimi. Ciepło zgodnie z II zasadą termodynamiki przechodzi od ciała o wyższej temperaturze do ciała o temperaturze niższej.

Wymiana ciepła zachodzi przez przewodnictwo, konwekcję i promieniowanie.

Ruch ciepła przez przewodnictwo odbywa się zarówno w ciałach stałych, jak i ciałach płynnych. W celu wyjaśnienia wymiany ciepła przez przewodnictwo przyjmuje się, że cząsteczki ośrodka (stałego, ciekłego lub gazowego), w którym odbywa się powyższa wymiana, mają ograniczoną swobodę ruchu, a przekazywanie ciepła przez jedną cząsteczkę drugiej zachodzi wskutek bezpośredniego stykania się cząsteczek ze sobą.

Wymiana ciepła przez konwekcję odbywa się w cieczach i gazach, czyli w ośrodkach, w których cząsteczki mają całkowitą swobodę przemieszczania się w granicach ośrodka. Konwekcją ciepła nazywamy przemieszczanie się energii cieplnej wraz z ośrodkiem. Wymiana ciepła przez konwekcję jest połączona z pobieraniem i oddawaniem ciepła na granicy faz. Cząsteczki dwóch różnych faz płynnej i stałej zderzają się na granicy, wymieniają między sobą energię, przy czym płynna faza pobiera i unosi energię, gdy jej temperatura jest niższa, a oddaje energię fazie stałej, gdy jej temperatura jest wyższa. Z powyższego wynika, że wymiana ciepła przez konwekcję nie jest możliwa w ciałach stałych, w których ruch ciepła odbywa się tylko przez przewodzenie.

Trzeci sposób wymiany ciepła — promieniowanie — jest związany z ruchem w przestrzeni energii promienistej, która powstaje nieprzerwanie z energii cieplnej na powierzchni każdego ciała. Intensywność przemiany energii cieplnej w energię promienistą jest tym większa, im

wyższą temperaturę posiada ciało. Powyższy proces polega na tym, że zgodnie z kinetyczną teorią materii drgające cząsteczki ciała zmieniają nadmiar swej energii w falowanie elektromagnetyczne o różnej częstotliwości, rozchodzące się w próżni z prędkością ok. 300 000 km/sek.

Powstawanie i ruch promieni cieplnych opiera się na tych samych zasadach co promieni świetlnych. Promieniowanie cieplne i świetlne podlegają wspólnym prawom fizycznym, a więc prawu prostoliniowego rozchodzenia się w jednorodnym ośrodku, prawom odbicia, załamania i pochłaniania. Różnią się one od siebie tylko długością fal. Promienie cieplne odpowiadają podczerwonej, niewidzialnej części widma i mają fale o długości od 0,8 do 40 μ , natomiast promienie świetlne, występujące w widzialnej części widma, mają fale o długości od 0,4 do 0,8 μ .

Próżnia przepuszcza promienie wszelkiego rodzaju i nie wywołuje w nich żadnych zmian. Czyste powietrze w warstwach o grubościach spotykanych w technice praktycznie również jest zupełnie przezroczyste dla promieni cieplnych. Natomiast gazy spalinowe zależnie od swego składu i grubości warstwy pochłaniają w większym lub mniejszym stopniu część promieniowania cieplnego.

Strumień energii promienistej, padający na powierzchnię dowolnego ciała, może ulec w ogólnym przypadku następującym przemianom: pewna część strumienia zostaje przez powierzchnię ciała odbita, inna jego część może być przez ciało pochłonięta i zamieniona w energię cieplną, pozostała zaś część strumienia może przejść poprzez ciało i wyjść z drugiej jego strony. Większość ciał stałych i ciekłych można uważać za zupełnie nieprzepuszczalne dla promieniowania. Ciała stałe zwykle część energii promienistej odbijają, resztę zaś pochłaniają, zamieniając ją w ciepło.

W warunkach technicznych wymiana ciepła najczęściej zachodzi jednocześnie przez przewodzenie, konwekcję i promieniowanie. W niektórych jednak przypadkach, np. w piecach przemysłowych, ten czy inny rodzaj wymiany ciepła może uzyskać przeważające znaczenie. W piecach szybowych do wypalania wapna, topienia żeliwa itp., posiadających małe przestrzenie swobodne, główną rolę przy wymianie ciepła odgrywa przewodzenie na skutek bezpośredniego kontaktu ciał wypełniających szyb. W piecach płomiennych (szklarskich, metalurgicznych i innych), w których produkty spalania paliwa przepływają przez stosunkowo duże objętościowo przestrzenie robocze, ciepło jest przekazywane ogrzewanym materiałom przede wszystkim przez promieniowanie. Gdy wymiana ciepła odbywa się w temperaturach niższych niż 700°C, znaczną, a często nawet decydującą rolę przy wymianie ciepła pomiędzy ogrzewającymi gazami a ogrzewanymi materiałami odgrywa wymiana ciepła na granicy faz w połączeniu z konwekcją. W piecach muflowych, w których ogrzewane wyroby nie stykają się z produktami spalania paliwa, decydujące znaczenie ma przewodzenie ciepła przez ściankę

mufla zabezpieczającej wyroby od bezpośredniego działania gazów spalinowych i następnie przekazywanie ciepła ogrzewanym wyrobom przez promieniowanie. Który z omówionych wyżej rodzajów wymiany ciepła ma w poszczególnych przypadkach decydujący wpływ, można rozstrzygnąć na podstawie dokładnej analizy zjawisk zachodzących w piecu i gruntownej znajomości praw rządzących przewodzeniem, unoszeniem i promieniowaniem ciepła.

Wymiana ciepła odgrywa ogromną rolę w nauce o piecach. Bez gruntownych wiadomości z zakresu podstaw teoretycznych przewodnictwa ciepła, konwekcji i promieniowania trudno zrozumieć istotę działania wielu pieców i wyjaśnić zjawiska, które w nich zachodzą. Poza tym dobra znajomość praw fizycznych, związanych z wymianą ciepła, jest konieczna do świadomego kierowania pracą pieca i wpływania w ten sposób na przebieg procesu technologicznego, który w nim zachodzi.

Zjawiska związane z wymianą ciepła, a więc przewodzenie, unoszenie i promieniowanie ciepła, są przedmiotem badań fizyki i inżynierii chemicznej. Szczególnie duże postępy w tej dziedzinie osiągnęła inżynieria chemiczna. Bogaty materiał uzyskany na skutek wszechstronnych badań doświadczalnych i rozważań teoretycznych nad wymianą ciepła, prowadzonych przez uczonych całego świata, pozwolił na wykrycie praw rządzących zjawiskami przewodzenia, konwekcji i promieniowania oraz ujęcie tych praw i innych wniosków z powyższych badań w równania, wzory matematyczne i wykresy. Na wynikach badań inżynierii chemicznej oraz na prawach i wzorach, w których ujęte zostały zjawiska wymiany ciepła, opiera się nauka o piecach.

Należy zaznaczyć, że ostatnio wydano w języku polskim kilka wartościowych prac poświęconych całkowicie zagadnieniom wymiany ciepła albo traktujących wymianę ciepła jako jeden z ważniejszych tematów. Do prac tego rodzaju należy przede wszystkim zaliczyć książkę Janusza Ciborowskiego pt. Inżynieria chemiczna (PWT. Warszawa 1955), a następnie pracę Tadeusza Hoblera pt. Ruch ciepła i wymienniki (PWT. Warszawa 1953) oraz książkę M. A. Michiejewa pt. Zasady wymiany ciepła (PWN. Warszawa 1953). W powyższych pracach teoretyczne podstawy przewodzenia, konwekcji i promieniowania ciepła zostały rozpatrzone z uwzględnieniem potrzeb techniki przemysłowej, w związku z czym wyprowadzone w tych pracach równania i wzory matematyczne, które wyrażają prawa rządzące wymianą ciepła, są przydatne do obliczeń technicznych.

Podstawowe wiadomości teoretyczne z dziedziny wymiany ciepła są na ogół znane zarówno inżynierom, jak i technikom, ewentualnym czytelnikom niniejszej pracy. W przeciwnym przypadku mogą oni te wiadomości uzupełnić lub rozszerzyć opierając się na wskazanych wyżej książkach. Biorąc powyższe pod uwagę oraz ze względu na ograniczoną objętość niniejszej pracy, nie będą w niej omawiane teoretyczne pod-

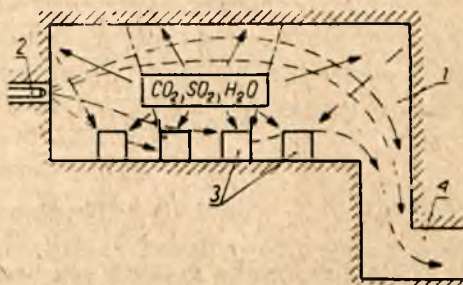
stawy wymiany ciepła. Nie będą również wyprowadzane potrzebne do obliczeń technicznych wzory matematyczne wyrażające podstawowe prawa przewodzenia, unoszenia i promieniowania ciepła.

2. Wymiana ciepła w komorze roboczej pieca

Źródłem ciepła w komorze roboczej pieca są gazy spalinowe, które najczęściej kończą w niej proces spalania, tworząc płomień. Gazy spalinowe przekazują ciepło przez konwekcję i promieniowanie sklepieniu i ścianom komory oraz znajdującym się w niej materiałom.

Część ciepła przekazanego przez gazy spalinowe ścianom i sklepieniu przewodzona jest na zewnątrz pieca i zwykle tracona nieużytecznie do atmosfery otaczającej piec. Drugą zaś część tego ciepła wypromieniuje w piecu wewnętrzna, rozżarzona powierzchnia obmurowa (sklepienie i ściany). Emitowane przy tym promieniowanie po przejściu przez

Rys. III-1. Schemat wymiany ciepła w komorze roboczej pieca: 1 — komora robocza, 2 — palnik, 3 — ogrzewane wyroby, 4 — kanał do komina, CO_2 , SO_2 , H_2O — płomień zawierający CO_2 , SO_2 , H_2O —→ promieniowanie płomienia na obmurowanie i wyroby, —→ promieniowanie obmurowania na wyroby, — — —→ przekazywanie ciepła od gazów do wyrobów przez konwekcję



warstwę gazów spalinowych pada częściowo na ogrzewane w piecu materiały i jest przez nie w dużej części pochłaniane. Sklepienie więc i ściany komory roboczej spełniają, jak z powyższego wynika, rolę wtórnych promienników.

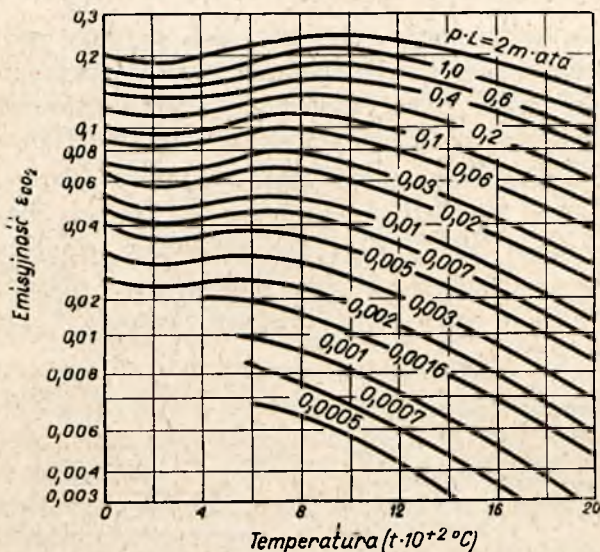
Na rys. III-1 zgodnie z przytoczonym opisem przedstawiono schemat przekazywania ciepła przez gazy spalinowe (płomień) ogrzewanym w piecu wyrobom.

Promieniowanie gazów spalinowych w dużym stopniu zależy od ich składu. Szczególne znaczenie ma obecność w nich dwutlenku węgla (CO_2) i pary wodnej (H_2O) oraz innych gazów, których cząsteczki również mają moment dipolowy. Natomiast zawartość w gazach spalinowych azotu (N_2) i tlenu (O_2), posiadających cząsteczki symetryczne, na wielkość promieniowania nie wywiera żadnego wpływu.

Promieniowanie gazów ma charakter selektywny, tj. emitują one promienie o określonej długości fal. Ich widmo jest prążkowe w odróżnieniu od widma ciał stałych, które jest ciągłe. Intensywność promieniowania poszczególnych gazów, wchodzących w skład gazów spalino-

wych, zależy od ciśnienia cząstkowego p , grubości warstwy L oraz w pewnym stopniu od kształtu warstwy.

N. C. Hottel, jeden z badaczy amerykańskich, opracował dla CO_2 wykres (rys. III-2), z którego można odczytać współczynnik emisji ϵ_{CO_2} tego gazu ¹⁾, jeżeli znane są jego temperatura $t^\circ\text{C}$, ciśnienie cząsteczko-



Rys. III-2. Współczynnik emisji ϵ dla CO_2

we p ata i zastępcza grubość warstwy gazów L w m. N. C. Hottel wprowadził zastępczą grubość warstwy (zamiast rzeczywistej) w celu uwzględnienia wpływu kształtu warstwy promieniującej. Zastępczą grubość warstwy wg N. C. Hottela można ustalić na podstawie tabl. III-1.

Podobny wykres (rys. III-3) opracował N. C. Hottel również dla określenia współczynnika emisji ϵ_0 pary wodnej. Ponieważ zależność współczynnika emisji H_2O jest bardziej skomplikowana, niż to zostało wyrażone na wykresie (rys. III-3), N. C. Hottel zaleca powiększenie współczynnika ϵ_0 dla H_2O , mnożąc jego wartość odczytaną z wykresu na rys. III-3 przez współczynnik poprawkowy β , wyznaczony z wykresu przedstawionego na rys. III-4, wtedy

$$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = \epsilon_0 \cdot \beta$$

Gazy spalinowe są mieszaniną różnych gazów. Biorąc pod uwagę, że zakresy fal promieni emitowanych przez poszczególne składniki mieszaniny mogą częściowo się pokrywać, a promieniowanie może częściowo wzajemnie się pochłaniać, nie jest dopuszczalne obliczanie współczyn-

¹⁾ Współczynnikiem emisji lub stopniem czarności ciała nazywa się stosunek zdolności emisyjnej danego ciała E do zdolności emisyjnej ciała doskonale czarnego E_c , czyli $\epsilon = \frac{E}{E_c}$.

Tablica III-1

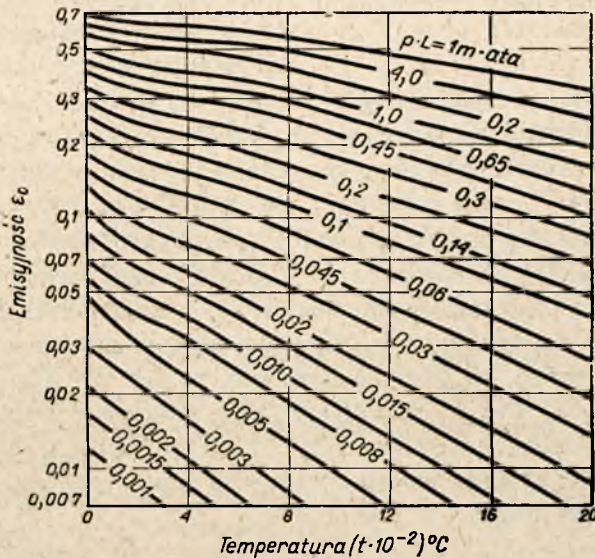
ZASTĘPCZA GRUBOŚĆ L WARSTWY GAZÓW PROMIENUJĄCYCH

L.p.	Kształt	Wymiar charakterystyczny D	L/D
1	Kula	średnica	0,60
2	Walec nieskończenie długi	"	0,90
3	Walec o średnicy równej wysokości, promieniujący do wewnętrznej powierzchni podstawy	"	0,77
4	Walec o średnicy równej wysokości, promieniujący do całej powierzchni	"	0,60
5	Półwalec nieskończenie długi, promieniujący do wewnętrznej powierzchni płaskiej ściany	"	0,63
6	Dwie nieskończenie długie płaszczyzny równoległe	odstęp	1,8
7	Sześcian	krawędź	0,60
8	Prostopadłościan o krawędziach 1·2·6	najkrótsza krawędź	1,06
9	Przestrzeń międzyrurkowa, rozstawienie trójkątne, prześwit równy średnicy	prześwit	2,8
10	Prześwit międzyrurkowa, rozstawienie kwadratowe, prześwit równy średnicy	,	3,5

nika emisji mieszaniny ϵ przy założeniu addytywności współczynników emisji jej składników. Uwzględniając, że azot i tlen nie wywierają wpływu na promieniowanie, współczynnik emisji gazów spalinowych można obliczać wg N. C. Hottela ze wzoru

$$\epsilon = \epsilon_{CO_2} + \beta \epsilon_0 - \Delta \epsilon \quad [III-1]$$

gdzie: ϵ_{CO_2} — współczynnik emisji dwutlenku węgla odczytany z wykresu na rys. III-2.



Rys. III-3. Współczynnik emisji ϵ_0 dla H_2O

ϵ_0 — współczynnik emisji pary wodnej odczytany z wykresu na rys. III-3,

β — współczynnik poprawkowy odczytany z wykresu na rys. III-4.

$\Delta\epsilon$ — poprawka odczytana z wykresów na rys. III-5.

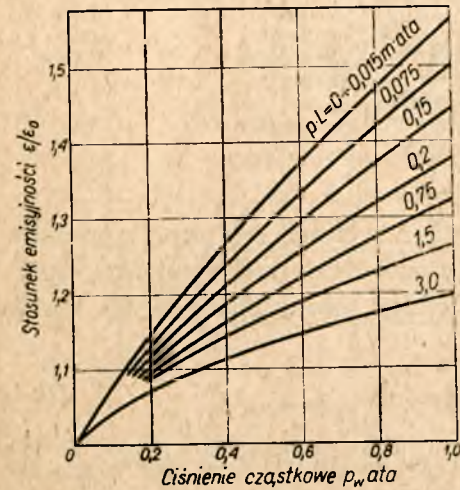
Poprawkę $\Delta\epsilon$, wprowadzoną do wzoru [III-1] ze względu na jednoczesne promieniowanie CO_2 i H_2O odczytuje się z wykresów podanych na rys. III-5 dla różnych iloczynów $(p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}})L$ w zależności od

stosunku $\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}}}$

Obliczenie współczynnika emisji gazów spalinowych ze wzoru [III-1] daje dobre wyniki tylko w przypadku, gdy gazy nie zawierają zawiesin

ciał stałych, w przeciwnym razie zarówno charakter promieniowania, jak i jego intensywność ulegają zmianie. Rozżarzone bowiem cząstki zawieszono-ego w gazach spalinowych ciała stałego biorą czynny udział w procesie promieniowania, wskutek czego widmo promieniującej mieszaniny staje się ciągłe, co oznacza, że promieniowanie traci selektywny charakter.

Duży wpływ na proces promieniowania palących się gazów, zawierających zawiesiny ciał stałych, posiadają wymiary zawieszonych cząstek. W przypadku powstawania zawiesin na skutek spalania pyłu węglowego, zawieszono-cząstki mają średnicę rzędu kilkudziesięciu mikronów, jeżeli



Rys. III-4. Współczynnik poprawkowy β dla H_2O

zaś powstały one z rozpadu węglowodorów, to wymiary ich wyrażają się w ułamkach mikrona. Oczywiście, promieniowanie płomienia świecącego będzie miało skutek tego inny charakter niż promieniowanie płomienia pyłu węglowego. Trzeba zaznaczyć, że intensywne świecenie płomienia nie oznacza wzrostu promieniowania cieplnego, ponieważ maksimum energii promienistej przypada na niewidzialną, podczerwoną część widma.

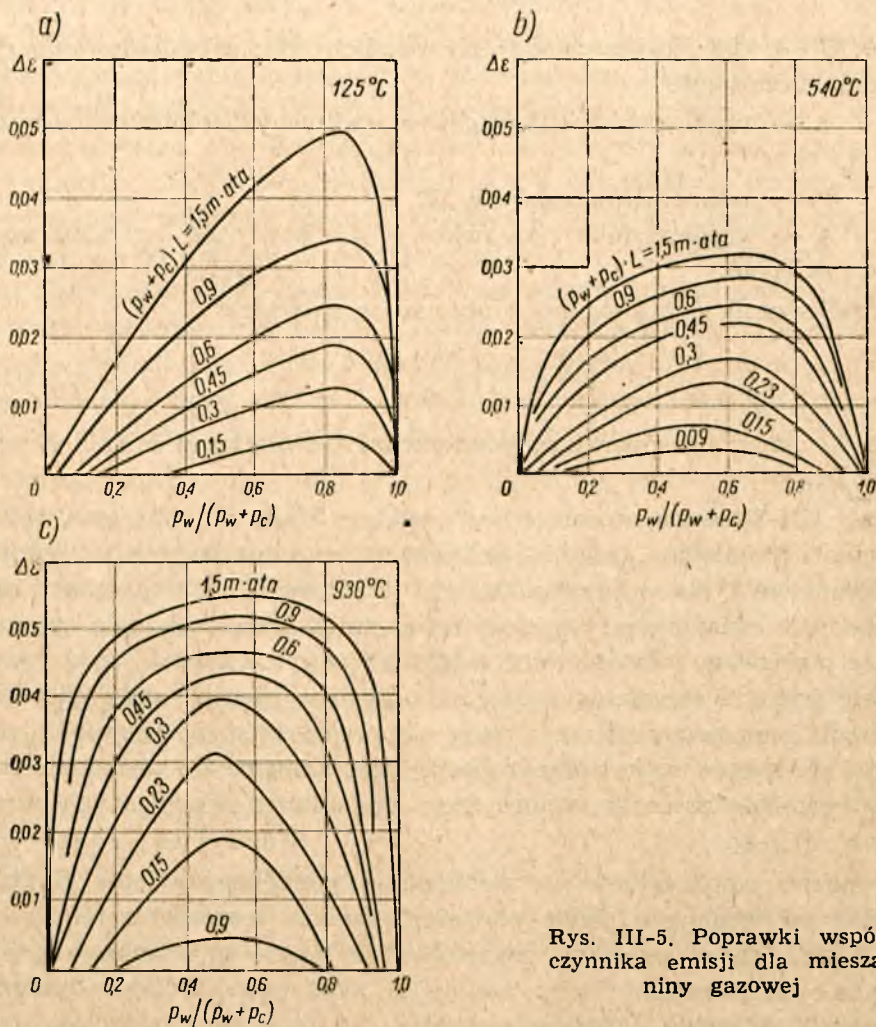
Dla płomienia płonącego pyłu węglowego współczynnik emisji ϵ zależy od promienia r cząstek pyłu, które odgrywają w odniesieniu do promieniowania rolę zasłon, od stężenia pyłu lub, co jest równoznaczne, od liczby n cząstek pyłu, zawartych w 1 cm^3 , oraz od grubości warstwy płomienia L . Zgodnie z badaniami teoretycznymi Nusselta i doświadczalnymi Shermana współczynnik emisji płomienia płonącego pyłu węglowego można wyrazić wzorem

$$\epsilon = 1 - e^{-n \cdot r^2 L} \quad \text{[III-2]}$$

gdzie $e = 2,718$ jest zasadą logarytmów naturalnych.

Przy spotykanych w technice stężeniach pyłu węglowego, wielkościach jego ziarn i grubościach warstw płomienia płonącego pyłu współczynniki emisji (lub absorpcji) są bardzo bliskie jedności. Płomień pyłu można więc w przybliżeniu traktować jako doskonale czarny ($\epsilon = \alpha = 1$).

Płomień świecący wskutek obecności w pyłe cząstek stałych (sadzy) o małych wymiarach traktuje się jako częściowo emitujący promienie



Rys. III-5. Poprawki współczynnika emisji dla mieszaniny gazowej

cieplne. Wobec braku danych o wielkości w tym przypadku cząstek stałych i ich stężeniu do celów praktycznych można przyjmować następujące orientacyjne wielkości stopnia czarności płomienia, gdy jego grubość wynosi ok. $L = 0,6$ m:

oczyszczony gaz generatorowy	0,13 — 0,20
nieoczyszczony gaz generatorowy	0,20 — 0,50
gaz ziemny lub paliwo płynne (mazut)	0,50 — 0,80
nieświecący płomień gazu ziemnego	0,20

Do obliczania wymiany ciepła przez promieniowanie pomiędzy gazami spalinowymi a powierzchnią sklepienia i ścian komory roboczej, wypełnionej tymi gazami, Wszechzwiązkowy Instytut Techniki Ciepłej ZSRR zaleca stosowanie następującego wzoru:

$$Q = C \cdot \varepsilon \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \cdot A \quad \text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \quad \text{[III-3]}$$

gdzie: C — $4,96 \cdot \text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot \text{°K}^4$ współczynnik promieniowania ciała doskonale czarnego,

ε — współczynnik emisji gazów spalinowych obliczony ze wzoru [III-1],

T_1 — temperatura gazów w °K ,

A — współczynnik poprawkowy na powrotne promieniowanie ścian i sklepień.

Współczynnik poprawkowy A oblicza się ze wzoru

$$A = 1 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^{3,6} \quad \text{[III-4]}$$

gdzie T_2 oznacza temperaturę powierzchni wewnętrznej ścian i sklepienia w °K .

Wzór [III-3] można stosować bez wielkiego błędu do obliczania wymiany ciepła pomiędzy gazami spalinowymi a otaczającymi je ścianami i sklepieniem tylko w przypadku, gdy współczynnik emisji ścian i sklepienia mało różni się od współczynnika emisji ciała doskonale czarnego. Biorąc pod uwagę własności cegły ogniotrwałej, z której są wykonywane zwykle ściany i sklepienia komór roboczych w piecach, oraz wielokrotność odbijania promieni, przyjmuje się praktycznie, że promieniowanie ścian i sklepienia w komorze roboczej jest zbliżone do promieniowania ciała doskonale czarnego, wobec czego do obliczeń technicznych stosuje się wzór [III-3].

Wymianę ciepła przez promieniowanie pomiędzy dwiema dowolnie położonymi względem siebie powierzchniami o temperaturach T_1 i T_2 °K oblicza się w ogólnym przypadku ze wzoru opartego na prawie Stefana — Boltzmanna, który podaje B. Stefanowski (Termodynamika techniczna. Warszawa 1949) w postaci

$$Q = c \cdot F_1 \cdot \varphi \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad \text{[III-5]}$$

gdzie: F_1 — wielkość jednej z tych powierzchni w m^2 ,

φ — stosunek energii promienistej wysyłanej przez jedno ciało do energii pochłoniętej przez ciało drugie (φ waha się w granicach od 1,0 do 0,2),

c — wypadkowy współczynnik promieniowania obliczony ze wzoru

$$c = \frac{c_1 \cdot c_2}{4,96}$$

gdzie c_1 i c_2 są współczynnikami promieniowania poszczególnych ciał.

Obliczanie wymiany ciepła w komorze roboczej pieca jest na ogół bardzo skomplikowane. Współczynniki emisji, temperatura płomienia oraz temperatura obmurowania nie są równomierne. Płomień najczęściej nie posiada prawidłowego kształtu geometrycznego, a oprócz tego w wymianie ciepła biorą również udział pośrednie warstwy gazów znajdujące się pomiędzy płomieniem, obmurowaniem a ogrzewanym materiałem. Poza tym dużą trudność sprawia obliczanie czynnika geometrycznego (współczynnika kąтового) wymiany ciepła przez promieniowanie pomiędzy płomieniem, materiałem i obmurowaniem. Zmiana temperatury w zależności od czasu w komorze roboczej pieców pracujących z regeneratorem wywołuje dodatkowe trudności przy obliczaniu wymiany ciepła. Z tego powodu przyjmuje się szereg upraszczających założeń umożliwiających obliczanie wymiany ciepła w piecu.

Założenia umożliwiające obliczanie wymiany ciepła w piecach są następujące:

a. Przyjmuje się średnie temperatury i średnie współczynniki emisji zamiast rzeczywistych w różnych miejscach i w różnych okresach czasu.

b. Przyjmuje się, że komora robocza pieca jest całkowicie wypełniona gazami spalinowymi o równomiernym współczynniku emisji.

c. W przypadku gdy z paleniska dostaje się do komory roboczej strumień palących się gazów, przyjmuje się, że strumień ten posiada równomierny współczynnik emisji, określony kształt geometryczny oraz znajduje się w ośrodku gazów posiadających inny, lecz również równomierny współczynnik emisji.

d. Zakłada się często w celu otrzymania dokładniejszych wyników, że temperatura ścian i sklepienia w różnych miejscach są różne. Przybliżony rozkład temperatur przyjmuje się na podstawie danych doświadczalnych.

Obliczanie wymiany ciepła w komorze roboczej pieca, wypełnionej gazami spalinowymi o równomiernym współczynniku emisji prowadzi się, zgodnie z pracami Wszechzwiązkowego Instytutu Techniki Ciepłej ZSRR, sporządzając ogólne i szczegółowe bilanse cieplne wszystkich ciał biorących udział w wymianie ciepła w komorze roboczej.

Sporządzając powyższe bilanse stwierdzamy zgodnie z rys. III-1, że ogrzewane w piecu materiały otrzymują ciepło wskutek promieniowania płomienia i obmurza oraz od gazów przez konwekcję połączoną z wy-

mianą ciepła na granicy faz, przy czym ilość ciepła uzyskiwanego przez materiał wskutek promieniowania gazów spalinowych wynosi

$$Q_1 = C_g \cdot F_m \cdot T_g^4 \text{ kcal/godz} \quad \text{[III-6]}$$

a sklepienia i ścian

$$Q_2 = Q_s (1 - \varepsilon_g) \varphi_m \text{ kcal/godz} \quad \text{[III-7]}$$

gdzie: C_g — współczynnik promieniowania płomienia (gazów spalinowych) w $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot \text{°K}^4$,

F_m — powierzchnia materiału, pobierająca ciepło przez promieniowanie, w m^2 ,

T_g — temperatura gazów spalinowych (płomienia) w °K ,

Q_s — całkowita ilość ciepła, wypromieniowana przez sklepienie i ściany w kcal/godz ,

φ_m — stosunek ilości ciepła uzyskanego przez materiał od sklepienia i ścian do całkowitej ilości ciepła Q_s wypromieniowanej przez obmurze,

ε_g — stopień czarności gazów spalinowych.

Wobec tego całkowita ilość ciepła przekazywanego przez promieniowanie ogrzewanym w komorze roboczej materiałom i wyrobom wynosi

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 = C_g \cdot F_m T_g^4 + Q_s (1 - \varepsilon_g) \varphi_m \text{ kcal/godz} \quad \text{[III-8]}$$

Część powyższego ciepła w ilości $Q_3 \cdot \varepsilon_m$ materiały pochłaniają, resztę zaś w ilości $Q_3 (1 - \varepsilon_m)$ odbijają.

Materiały znajdujące się w piecu są również źródłem promieniowania. Promieniowanie ich składa się z promieniowania własnego i promieniowania odbitego.

Ilość ciepła wypromieniowanego przez materiał wynosi

$$Q_4 = Q_3 (1 - \varepsilon_m) + C_m \cdot F_m \cdot T_m^4 \text{ kcal/godz} \quad \text{[III-9]}$$

gdzie: ε_m — współczynnik emisji materiału,

C_m — współczynnik promieniowania materiału w $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot \text{°K}^4$,

T_m — temperatura materiału w °K .

Materiał poza promieniowaniem uzyskuje ciepło od gazów spalinowych również i przez wymianę ciepła na granicy faz w ilości wynoszącej

$$Q_5 = F_m (T_g - T_m) \cdot \alpha_m = F_m \cdot q_m \text{ kcal/godz} \quad \text{[III-10]}$$

gdzie α_m oznacza cząstkowy współczynnik przenikania ciepła od gazów spalinowych do materiału w $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot \text{°K}$.

Wobec tego ilość ciepła, które uzyskuje materiał, wynosi

$$Q = Q_3 - Q_4 + Q_5 = [C_g \cdot F_m \cdot T_g^4 + Q_s (1 - \varepsilon_g) \varphi_m] \cdot \varepsilon_m - C_m F_m T_m^4 + F_m q_m \text{ kcal/godz} \quad \text{[III-11]}$$

Sklepienie i ściany komory roboczej pieca otrzymują ciepło przez promieniowanie:

1. od gazów spalinowych w ilości

$$Q_6 = C_g \cdot F_s \cdot T_g^4 \text{ kcal/godz} \quad [\text{III-12}]$$

gdzie F_s oznacza powierzchnię sklepienia i ścian w m^2 ,

2. od ogrzewanego materiału w ilości

$$Q_7 = Q_4 (1 - \epsilon_g) \text{ kcal/godz} \quad [\text{III-13}]$$

3. od różnych części ścian i sklepienia, które promieniają wzajemnie na siebie, w ilości

$$Q_8 = Q_s (1 - \epsilon_g) \varphi_k \text{ kcal/godz} \quad [\text{III-14}]$$

gdzie φ_k — oznacza stosunek ilości ciepła uzyskanego przez obmurze wskutek własnego promieniowania do całkowitej ilości ciepła Q_s wypromieniowanego przez obmurze.

Ponieważ oprócz powierzchni materiału i obmurza w komorze roboczej pieca nie ma innych powierzchni biorących udział w wymianie ciepła przez promieniowanie, to

$$\varphi_k = 1 - \varphi_m \quad [\text{III-15}]$$

Poza tym gazy spalinowe przekazują ciepło obmurzu przez wymianę ciepła na granicy faz w ilości następującej:

$$Q_9 = F_s \cdot (T_g - T_s) \alpha_s = F_s \cdot q'_s \text{ kcal/godz} \quad [\text{III-16}]$$

gdzie α_s oznacza cząstkowy współczynnik przenikania ciepła od gazów spalinowych do obmurza komory roboczej w $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{K}$.

Straty ciepła przez obmurze do atmosfery otaczającej piec wynoszą

$$Q_{10} = F_s \cdot q''_s \quad [\text{III-17}]$$

gdzie q''_s oznacza ciepło tracone przez $1 m^2$ obmurza w ciągu godziny w $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz}$.

Wobec tego ilość ciepła wypromieniowanego przez obmurze (sklepienie i ściany) komory roboczej wynosi

$$Q_s = Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 - Q_{10} \text{ kcal/godz} \quad [\text{III-18}]$$

skąd

$$Q_s = C_g F_s T_g^4 + Q_4 (1 - \epsilon_g) + Q_s (1 - \epsilon_g) \varphi_k + F_s q'_s - F_s q''_s \text{ kcal/godz} \quad [\text{III-19}]$$

Z powyższego wzoru po odpowiednich podstawieniach i przekształceniach otrzymamy

$$Q_s = \frac{C_g F_s T_g^4 + C_g F_m T_g^4 (1 - \epsilon_m) \cdot (1 - \epsilon_g) + C_m F_m T_m^4 (1 - \epsilon_g) + F_s (q'_s - q''_s)}{1 - (1 - \epsilon_g)^2 \cdot (1 - \epsilon_m) \cdot \varphi_m - (1 - \epsilon_g) \cdot (1 - \varphi_m)} \text{ kcal/godz} \quad [\text{III-20}]$$

Podstawiając wartość Q_s do wzoru [III-11], obliczymy ilość ciepła Q , którą uzyskuje materiał ogrzewany w komorze roboczej pieca.

Z analizy wzorów [III-11] i [III-20] wynika, że im wyższa temperatura panuje w piecu, tym większe znaczenie ma wymiana ciepła przez promieniowanie. W piecach, w których proces technologiczny zachodzi w wysokich temperaturach, np. w piecach płomiennych do wytapiania szkła lub topienia stali, można praktycznie przyjmować, że prawie całkowita ilość ciepła jest przekazywana ogrzewanym w nich materiałom przez promieniowanie, natomiast wymiana ciepła na granicy faz odgrywa w tym przypadku minimalną rolę.

Jak wynika z powyższego, obliczanie ilości ciepła, którą otrzymuje ogrzewany w piecu materiał, jest bardzo skomplikowane i pochłania dużo czasu i pracy. Szczególnie trudne, a często nawet niemożliwe, jest dostatecznie dokładne obliczenie tego ciepła, jeżeli objętość komory roboczej jest dość szczelnie wypełniona ogrzewanymi wyrobami. W tych przypadkach oraz wtedy, gdy chodzi o szybkie uzyskanie przybliżonych, orientacyjnych wyników, można posługiwać się wzorami empirycznymi. Jeden z dość często stosowanych wzorów jest następujący

$$Q = \alpha F_m (t_g - t_m) \text{ kcal/godz} \quad [\text{III-21}]$$

gdzie: α — współczynnik przenikania ciepła od gazów do ogrzewanego materiału w $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{K}$, uwzględniający jednoczesną wymianę ciepła na granicy faz i przez promieniowanie,

t_g, t_m — temperatury gazów i materiału w $^\circ\text{C}$.

Wartość współczynnika α dla pieców komorowych oblicza się ze wzoru

$$\alpha = 45 + 0,25 (t_g - 700) \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C} \quad [\text{III-22}]$$

a dla pieców płomiennych do ogrzewania bloków stalowych ze wzoru

$$\alpha = 50 + 0,30 (t_g - 700) \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C} \quad [\text{III-23}]$$

Czas ogrzewania materiałów w piecu. Ciepło przekazywane przez promieniowanie i wymianę ciepła na granicy faz powierzchni zewnętrznej ogrzewanych ciał przechodzi stopniowo wskutek przewodnictwa do ich warstw wewnętrznych, gdzie panuje znacznie niższa temperatura. Ilość ciepła przechodzącego z powierzchni do wnętrza ogrzewanego ciała w miarę upływu czasu zmniejsza się, ponieważ temperatura wewnątrz wzrasta, a różnica temperatur maleje. Proces ogrzewania uznaje się za zakończony, gdy różnica pomiędzy temperaturą na powierzchni ciała i wewnątrz niego jest dostatecznie mała, tj. gdy jest ona mniejsza od wielkości dopuszczalnej. Osiągnięcie wewnątrz ciała takiej samej temperatury jak na jego powierzchni wymagałoby bardzo długiego okresu czasu.

Proces ogrzewania wyrobów w piecu ze względu na jego wydajność powinien trwać krótko. W tym celu należy utrzymywać w komorze roboczej możliwie wysoką temperaturę, nie wyższą jednak od najwyższej

temperatury dopuszczalnej dla ogrzewanego materiału. Zbyt wysoka bowiem temperatura może wywołać przegrzanie powierzchni ogrzewanych wyrobów, podczas gdy wewnątrz nich nie zostanie jeszcze osiągnięta wymagana temperatura. Nie jest to pożądane, ponieważ przegrzanie wyrobów na powierzchni albo niedogrzanie wewnątrz prawie zawsze wpływa ujemnie na jakość wyrobów i jest przyczyną powstawania braków.

Ilość ciepła, którą otrzymuje ogrzewane ciało w piecu w ciągu nieskończonego krótkiego czasu $d\tau$, jak wynika ze wzoru [III-21], wynosi

$$dQ = \alpha F_m (t_g - t_m) d\tau \text{ kcal} \quad [\text{III-24}]$$

W powyższym wzorze różnica temperatur pomiędzy gazami i ciałem zmienia się z upływem czasu, ponieważ w miarę trwania ogrzewania temperatura materiału t_m zwiększa się.

Ilość ciepła przekazywanego wyrobom przez cały okres ogrzewania można również obliczyć ze wzoru

$$Q = G (I_2 - I_1) \text{ kcal} \quad [\text{III-25}]$$

gdzie: G — ciężar ciała w kG,

I_1, I_2 — początkowa i końcowa entalpia ciała w kcal/kg.

Uwzględniając wzory [III-24] i [III-25], otrzymamy

$$\alpha \cdot F_m \int_0^\tau (t_g - t_m) d\tau = G (I_2 - I_1) \quad [\text{III-26}]$$

Z tego równania można obliczyć czas τ potrzebny na ogrzanie w piecu obrabianych w nim materiałów, jeżeli są znane zależności t_g i t_m od czasu.

Gdy temperatura gazów ogrzewających t_g jest stała w komorze roboczej pieca ($t_g = \text{const}$), temperatura ogrzewanych wyrobów t_m wzrasta wg krzywej parabolicznej, wtedy można napisać

$$t_g - t_{sr m} = \frac{1}{3} (t_g - t_{1 m}) \text{ } ^\circ\text{C} \quad [\text{III-27}]$$

gdzie $t_{sr m}$ i $t_{1 m}$ — są odpowiednio średnią i początkową temperaturą ogrzewanego materiału w $^\circ\text{C}$.

Czas potrzebny na ogrzanie ciała w piecu przy stałej temperaturze gazów ogrzewających t_g , jak wynika z równania [III-26], wyniesie

$$\tau = \frac{3G (I_2 - I_1)}{\alpha F_m (t_g - t_{1 m})} \text{ godz} \quad [\text{III-28}]$$



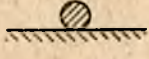

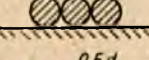

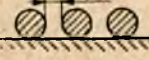
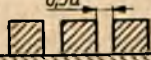
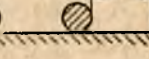

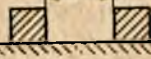
Powyższy wzór daje dobre wyniki tylko w przypadku, gdy w komorze roboczej pieca ogrzewa się jeden lub kilka daleko od siebie położonych wyrobów, przy czym ogrzewanie ich zachodzi jednocześnie ze wszystkich stron (tj. od dołu, z góry i ze wszystkich boków). Zwykle w piecach ogrzewa się ich jednocześnie znacznie więcej, wskutek czego znajdują się one w komorze roboczej blisko siebie i dlatego czas ich ogrzewania

trwa dłużej niż wynika ze wzoru [III-28]. Z tego powodu dla otrzymania rzeczywistego czasu ogrzewania czas obliczony ze wzoru [III-28] zwiększa się, mnożąc jego wartość przez współczynnik poprawkowy β większy od 1, ustalony w sposób doświadczalny, wtedy

$$\tau_{rz} = \beta \tau \quad \text{[III-29]}$$

Wielkości współczynników poprawkowych przy ogrzewaniu bloków stalowych są podane na rys. III-6.

Jeżeli temperatura gazów w piecu zmienia się, to wzoru [III-28] nie można stosować. W tym przypadku oblicza się czas τ potrzebny na

Rozmieszczenie wyrobów	Czas ogrzewania τ	Rozmieszczenie wyrobów	Czas ogrzewania τ
	1,0		1,0
	1,0		1,4
	2,0		4,0
	1,4		2,2
	1,3		2,0
			1,8

Rys. III-6. Zależność czasu ogrzewania wyrobów od ich kształtu i sposobu ustawienia w piecu

ogrzanie wyrobów w piecu z dużym przybliżeniem, przyjmując we wzorze [III-26] zamiast zmiennej w czasie różnicy temperatur $t_g - t_m$ średnią różnicę $t_{sr g} - t_{sr m}$, wtedy

$$\tau = \frac{G (I_2 - I_1)}{\alpha \cdot F_m (t_{sr g} - t_{sr m})} \text{ godz} \quad \text{[III-30]}$$

Trzeba pamiętać, że obliczoną z powyższego wzoru wartość czasu ogrzewania wyrobów w piecu należy również pomnożyć przez współczynnik poprawkowy β i otrzymany w ten sposób wynik traktować tylko jako wielkość orientacyjną.

3. Bilanse pieców. Bilans materiałowy

O prawidłowym działaniu pieca z punktu widzenia gospodarki cieplnej sądzimy na podstawie jego bilansu cieplnego, który zwykle sporządza się w oparciu o bilans materiałowy.

Dla sporządzenia bilansów materiałowego i cieplnego pieca przeprowadza się odpowiednie pomiary i badania instalacji piecowej w czasie jej ruchu w celu ustalenia danych potrzebnych do sporządzania bilansów (np. ciężaru, składu i temperatury wsadu, powietrza, paliwa, otrzymanych w piecu produktów itd.). W przypadku gdy bilanse są układane dla instalacji projektowanej, potrzebne wielkości ustala się na podstawie założeń technologicznych i technicznych.

Mając bilans cieplny instalacji piecowej, można określić, jaka część ciepła doprowadzonego do pieca została zużyta użytecznie oraz z jakich pozycji składa się nieużyteczny rozchód, czyli straty ciepła.

Rozbijanie przychodu i rozchodu ciepła na poszczególne pozycje ma tę dobrą stronę, że umożliwia łatwe wyjaśnienie, które pozycje przychodu mają istotny wpływ na ilość doprowadzonego ciepła oraz które pozycje rozchodu decydują o takim czy innym zużyciu paliwa w piecu, a poza tym ułatwia zorientowanie się, gdzie z punktu widzenia cieplnego są słabe strony rozpatrywanej instalacji. Pozwala to w wielu przypadkach na zastosowanie odpowiednich środków zmniejszających straty cieplne, a przez to i zużycie paliwa w piecu.

Przy układaniu bilansów materiałowego i cieplnego bardziej skomplikowanej instalacji piecowej często sporządza się poprzednio bilanse najważniejszych jej części, jak paleniska, komory roboczej i urządzeń do odzyskiwania ciepła gazów odlotowych, albo jak w piecach tunelowych, kręgowych lub niektórych szybowych — bilanse strefy przedogniowej, ogniowej i poogniowej. Bilanse materiałowy i cieplny całej instalacji otrzymuje się jako zestawienia bilansów poszczególnych części.

Bilanse pieców o działaniu ciągłym są sporządzane w przeliczeniu na 100 kg (lub 1 t) albo na 100 (lub 1000) sztuk uzyskanych z pieca gotowych wyrobów lub wprowadzonych do niego surowców. Czasami bilanse są układane dla jednej godziny (lub 1 doby) pracy pieca. Dla pieców o działaniu okresowym bilanse materiałowy i cieplny sporządza się dla okresu czasu, odpowiadającego jednemu cyklowi jego pracy.

Bilanse materiałowe są oparte na prawie zachowania masy. Wyjaśniają one, jak zostały wyzyskane materiały wprowadzane do pieca oraz jakiej są wielkości i w jakich pozycjach bilansu są straty materiałów w rozpatrywanym obiekcie. Szczególnie dużą korzyść przynosi sporządzanie bilansów materiałowych w przypadku, gdy w piecu zachodzą złożone procesy technologiczne i reakcje chemiczne związane ze zmianą struktury i stanu skupienia materiałów.

Bilans materiałowy układu się zwykle, jak już było uprzednio zaznaczone, przed bilansami cieplnymi. Sporządza się je najczęściej w kg, rzadziej w molach lub w m³.

Dla przykładu podano niżej przebieg obliczeń bilansu materiałowego pieca do wypalania wapna, ustawionego w jednej z cukrowni, oraz bilansu materiałowego paleniska.

Bilans materiałowy pieca szybowego do wypalania wapna (rys. V-3) został sporządzony w przeliczeniu na 100 kg kamienia wapiennego. Jako paliwo zastosowano koks o składzie: C — 87%, H₂ — 0,4%, O₂ — 1,5%, N₂ — 2%, S — 1,2%, H₂O — 2% i popiół — 5,9%. Ilość koksu stanowi 9% wag. kamienia wapiennego. Do spalania wprowadzono powietrze w nadmiarze wynoszącym 30%. Skład wypalanego kamienia wapiennego jest następujący: CaCO₃ — 95,6%, MgCO₃ — 1,5%, H₂O — 0,5%, innych zanieczyszczeń — 2,4%.

Teoretyczną ilość powietrza potrzebnego do spalania 1 kg paliwa można obliczyć ze znanego z teorii spalania wzoru

$$L_t = \frac{\left(\frac{8}{3}C + 8H - O + S\right) 100}{23} \quad \text{[III-31]}$$

Podstawiając do powyższego wzoru wartości liczbowe otrzymamy

$$L_t = \frac{\left(\frac{8}{3} \cdot 0,87 + 8 \cdot 0,004 - 0,015 + 0,012\right) \cdot 100}{23} = 10,213 \text{ kg}$$

Biorąc pod uwagę, że współczynnik nadmiaru powietrza wynosi $\lambda = 1,3$, obliczymy ilość powietrza rzeczywiście zużytego do spalania 1 kg koksu

$$L_{rz} = \lambda L_t = 1,3 \cdot 10,213 = 13,278 \text{ kg}$$

w tym tlenu

$$13,278 \cdot 0,23 = 3,054 \text{ kg}$$

i azotu

$$13,278 - 3,054 = 10,224 \text{ kg}$$

Ponieważ do pieca wprowadza się 9 kg koksu, ilość wprowadzanego powietrza wynosi

$$9 \cdot 13,278 = 119,502 \text{ kg}$$

W związku z powyższym bilans materiałowy rozpatrywanego pieca wapiennego przedstawia się w sposób następujący:

A. PRZYCHÓD

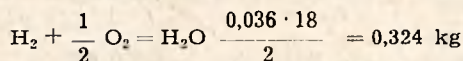
1. Kamień wapienny		100 kg
w tym węglanu wapniowego	95,6 kg	
węglanu magnezowego	1,5 kg	
wilgoci (H ₂ O)	0,5 kg	
zanieczyszczeń	2,4 kg	
	<hr/>	100,0 kg

2. Koks			9 kg
w tym węgla	$\frac{9 \cdot 87}{100}$	7,830 kg	
wodoru	$\frac{9 \cdot 0,4}{100}$	0,036 kg	
tlenu	$\frac{9 \cdot 1,5}{100}$	0,135 kg	
siarki	$\frac{9 \cdot 1,2}{100}$	0,108 kg	
wody	$\frac{9 \cdot 2}{100}$	0,180 kg	
azotu	$\frac{9 \cdot 2}{100}$	0,180 kg	
popiołu	$\frac{9 \cdot 5,9}{100}$	0,531 kg	
		<u>9,000 kg</u>	
3. Powietrze			119,502 kg
w tym tlenu		9 · 3,054 — 27,486 kg	
azotu		9 · 10,224 — 92,016 kg	
		<u>119,502 kg</u>	
		<u>Razem</u>	<u>228,502 kg</u>

B. ROZCHÓD

1. Tlenek wapniowy zgodnie z równaniem			
	$\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$	$\frac{95,6 \cdot 56}{100} =$	53,536 kg
	100 =	56 + 44	
2. Tlenek magnezowy zgodnie z równaniem			
	$\text{MgCO}_3 = \text{MgO} + \text{CO}_2$	$\frac{1,5 \cdot 40}{84} =$	0,714 kg
	84 =	40 + 44	
3. Popiół i zanieczyszczenia			2,931 kg
w tym z kamienia wapiennego		2,4 kg	
z koksu		0,531 kg	
		<u>2,931 kg</u>	
4. Azot			92,196 kg
w tym z powietrza		92,016 kg	
z koksu		0,18 kg	
		<u>92,196 kg</u>	
5. Dwutlenek węgla			71,557 kg
w tym ze spalania węgla wg równania			
	$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$	$\frac{7,83 \cdot 44}{12} = 28,710 \text{ kg}$	
	12 + 32 =	44	
	z rozkładu CaCO_3	95,6 — 53,536 =	42,064 kg
	z rozkładu MgCO_3		
		1,5 — 0,717	0,783 kg
		<u>71,557 kg</u>	

6. Para wodna 1,004 kg
w tym ze spalania wodoru wg równania



$$2 + 16 = 18$$

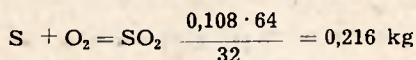
z paliwa 0,180 kg

z kamienia wapiennego 0,500 kg

1,004 kg

7. Dwutlenek siarki 0,216 kg

ze spalania siarki wg równania



$$32 + 32 = 64$$

8. Tlen 6,210 kg

z nadmiaru powietrza wg równania

$$27,486 - \frac{8}{3} \text{C} - 8\text{H} - \text{S} = 27,486 - \frac{8}{3} \cdot 7,83 - 8 \cdot 0,036 - 0,108 = 6,210 \text{ kg}$$

9. Błąd rachunkowy 0,139 kg

Razem 228,502 kg

Z powyższego bilansu można wyciągnąć następujące ważne dla cukrowni wnioski:

1. Wydajność tlenku wapniowego w omawianym piecu wynosi 58,536 kg na 100 kg kamienia wapiennego.

2. Wydajność gazów zawierających dwutlenek węgla (tzw. gazów saturacyjnych) w przeliczeniu na 100 kg kamienia wapiennego wynosi

$$\text{CO}_2 - 71,557 \text{ kg} \quad \text{lub} \quad 71,557 \cdot \frac{22,4}{44} = 36,420 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 - 92,196 \text{ kg} \quad \text{lub} \quad 92,196 \cdot \frac{22,4}{28} = 73,757 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 - 6,210 \text{ kg} \quad \text{lub} \quad 6,210 \cdot \frac{22,4}{32} = 4,347 \text{ m}^3$$

$$\text{SO}_2 - \frac{0,216 \text{ kg}}{170,179 \text{ kg}} \quad \text{lub} \quad 0,216 \cdot \frac{22,4}{64} = \frac{0,076 \text{ m}^3}{114,600 \text{ m}^3}$$

3. Zawartość procentowa dwutlenku węgla w % objętościowych wynosi

$$\frac{36,420}{114,600} 100 = 31,78\%$$

Bilanse materiałowe często dogodniej jest sporządzać nie w kilogramach, lecz w molach. W celu wyjaśnienia przebiegu obliczeń w tym przypadku poniżej został sporządzony bilans materiałowy paleniska na węgiel kamienny w kopalni „Saturn”.

Bilans materiałowy paleniska. W czasie przeprowadzonych badań paleniska będącego w ruchu nie stwierdzono w gazach spalinowych obecności tlenku węgla i uzyskano następujące wyniki pomiarów:

powierzchnia rusztów	$R = 3 \text{ m}^2$
ilość spalonego paliwa	$G_w = 315 \text{ kg}$
skład paliwa C — 69,86%, H ₂ — 4,47%, O ₂ — 11,95%, N ₂ — 1,56%, S — 0,56%, H ₂ O — 7,11%, popiół A — 4,49%	
straty w żużlu i straty popielnikowe	$s = 24\%$
współczynnik nadmiaru powietrza	$\lambda = 1,6$
temperatura powietrza	$t_0 = 16^\circ\text{C}$
wilgotność powietrza	$\varphi = 80\%$
ciśnienie barometryczne	$B = 735 \text{ mm Hg}$

Bilans materiałowy rozpatrywanego paleniska ułożymy dla 1 kg paliwa. Dla przejrzystości potrzebne obliczenia prowadzimy w postaci tablicy pomocniczej.

Paliwo						Powietrze		Gazy spalinowe			
						O ₂ teoretyczna ilość	ilość powietrza przy nadmiarze $\lambda = 1,6$	CO ₂ SO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	G	G	G	$\frac{G}{\text{mol}}$	mole	mole	mole	mole	mole	mole	mole
C	698,6	14,2	684,4	12	57	57		57			
H	44,7		44,7	2	22,3	11,2			22,3		
O	119,5		119,5	32	3,7	— 3,7	103,5			38,8	
N	15,6		15,6	28	0,6	—	389,2				389,8
S	5,6		5,6	32	0,2	0,2		0,2			
H ₂ O	71,1		71,1	18	4,0	—	7,3		11,3		
A	44,9	44,9									
	1000,0	59,1	940,9		87,8	64,7	500	57,2	33,6	38,8	389,8

519,4 mola

Zaczynamy od ustalenia strat węgla w żużlu i w popiele. Zgodnie z wynikami pomiarów straty w żużlu i w popiele wynoszą 24%, tzn. w odprowadzonym z paleniska żużlu i popiele węgiel stanowi 24%, a żużel i popiół 76%, wobec czego z każdego kilograma paliwa do popiołu i żużla przeszło

$$\frac{24}{76} \cdot A = \frac{24}{76} \cdot 44,9 = 14,2 \text{ g}$$

węgla oraz 44,9 g popiołu, pozostałe zaś składniki paliwa przeszły do gazów spalinowych, biorąc czynny lub bierny udział w spalaniu.

Otrzymany wynik wpisujemy do 3 rubryki tablicy pomocniczej (w rubryce 2 jest podana zawartość poszczególnych składników paliwa w gramach na 1 kg paliwa). W rubryce 4 podano składniki paliwa, które przeszły do gazów spalinowych, obliczone w gramach, a w rubryce 6 — w molach (w rubryce 5 umieszczono odpowiednie ciężary molowe).

Ilość tlenu, potrzebna teoretycznie do spalania poszczególnych składników paliwa jest obliczona i podana w rubryce 7. W rzeczywistości tlenu wprowadzono 1,6 razy więcej, czyli

$$1,6 \cdot 64,7 = 103,5 \text{ mola}$$

Razem z tlenem wprowadzono z powietrzem azot w ilości

$$\frac{79}{21} \cdot 103,5 = 389,2 \text{ mola}$$

oraz parę wodną, która zawsze znajduje się w powietrzu.

Skład molowy (i objętościowy) powietrza wilgotnego przy ciśnieniu barometrycznym 735 mm Hg, w temp. 16 °C i wilgotności 80% obliczamy w sposób następujący:

Prężność pary wodnej w temp. 16 °C, jak wynika z tablic pary wodnej nasyconej, wynosi 13,62 mm Hg, wobec tego ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu równa się

$$0,80 \cdot 13,62 = 10,92 \text{ mm Hg}$$

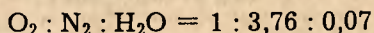
a ciśnienie cząstkowe suchego powietrza wynosi

$$735 - 10,92 = 724,08 \text{ mm Hg}$$

Na 1 mol tlenu powietrza przypada 3,76 moli azotu. Biorąc pod uwagę, że ilości molowe (lub objętościowe) poszczególnych składników mieszaniny gazowej są proporcjonalne do ich ciśnień cząstkowych, obliczymy, ile pary wodnej przypada na 1 mol tlenu w powietrzu wilgotnym

$$(1 + 3,76) \frac{10,92}{724,08} = 0,07 \text{ mola}$$

Wobec tego skład molowy (i objętościowy) wilgotnego powietrza wprowadzanego do obliczanego paleniska jest następujący:



a ilość wilgoci wprowadzanej z powietrzem równa się

$$0,07 \cdot 103,5 = 7,3 \text{ mola}$$

Ilości poszczególnych składników powietrza wprowadzonego do paleniska są podane w rubryce 8. Ilość zaś składników otrzymanych gazów spalinowych są umieszczone w rubrykach 9, 10, 11 i 12. Sposób ich obliczania jest łatwy i nie wymaga objaśnień.

Opierając się na tablicy pomocniczej, sporządzamy bilans następujący:

A. PRZYCHÓD

1. Paliwo	87,8 mola + 59,1 g
2. Powietrze	500,0 mola
Razem	587,8 mola + 59,1 g

B. ROZCHÓD

1. Gazy spalinowe	519,4 mola
2. Zużel	59,1 g

Różnica pomiędzy przychodem i rozchodem jest spowodowana sporządzeniem bilansu materiałowego w molach. Ażeby sprawdzić, czy nie popełniono przy układaniu bilansu błędów i omyłek, można by było obliczyć zmniejszenie ilości moli, zachodzące podczas reakcji przebiegających w palenisku. Przy bezbłędnym obliczeniu bilansu zmniejszenie ilości moli powinno być równe powyższej różnicy.

4. Bilans cieplny

Sporządzanie bilansów cieplnych jest oparte na prawie zachowania energii. Układa się je zwykle w kcal i w %. Przedstawienie poszczególnych pozycji bilansów cieplnych w procentach ułatwia porównywanie ze sobą bilansów instalacji piecowych tego samego typu, pracujących w różnych zakładach przemysłowych, lub bilansów cieplnych pieców różnych typów, przeznaczonych do przeprowadzania takich samych procesów technologicznych (np. pieców szybowych i kręgowych do wypalania kamienia wapiennego).

Przy sporządzaniu bilansów cieplnych za temperaturę odniesienia przyjmuje się temperaturę otoczenia albo częściej temperaturę 0°C. W pierwszym przypadku bilans jest nieco prostszy, w drugim zaś — logiczniejszy.

Po stronie przychodu w bilansach cieplnych pieców umieszcza się ciepło doprowadzone z paliwem, powietrzem, surowcami oraz efekt cieplny reakcji egzotermicznych zachodzących w piecu, po stronie zaś rozchodu — ciepło odprowadzone z produktami, odpadkami i urządzeniami pomocniczymi (np. tygle i inne), efekt cieplny reakcji endotermicznych oraz straty ciepła wskutek niezupełnego i niecałkowitego spalania, straty kominowe, straty na ogrzanie obmurza, straty z wodą chłodzącą niektóre części pieca oraz straty ciepła do otoczenia przez przewodnictwo, promieniowanie i z wypływającymi gazami przez otwory w ścianach.

Ogólny schemat bilansu cieplnego pieca jest następujący:

A. PRZYCHÓD

1. Ciepło doprowadzone z paliwem	Q_1 kcal	$a_1\%$
a. Energia chemiczna paliwa Q_1'		
b. Ciepło fizyczne paliwa Q_1''		
2. Ciepło doprowadzone z powietrzem	Q_2 kcal	$a_2\%$
3. Ciepło zawarte w doprowadzanych surowcach	Q_3 kcal	$a_3\%$
a. Ciepło zawarte w materiale I — Q_3'		
b. Ciepło zawarte w materiale II — Q_3''		
.....
4. Ciepło zawarte w urządzeniach pomocniczych	Q_4 kcal	$a_4\%$
5. Efekt cieplny reakcji egzotermicznych	Q_5 kcal	$a_5\%$
	<hr/>	
Razem	Q_{prz} kcal	100%

B. ROZCHÓD

1. Ciepło odprowadzane w produktach	Q_6 kcal $a_6^{\text{‰}}$
2. Ciepło odprowadzone w odpadkach	Q_7 kcal $a_7^{\text{‰}}$
3. Efekt cieplny reakcji endotermicznych	Q_8 kcal $a_8^{\text{‰}}$
4. Ciepło odprowadzone w urządzeniach pomocniczych	Q_9 kcal $a_9^{\text{‰}}$
5. Straty wskutek niezupełnego spalania	Q_{10} kcal $a_{10}^{\text{‰}}$
6. Straty wskutek niecałkowitego spalania	Q_{11} kcal $a_{11}^{\text{‰}}$
7. Straty ciepła z gazami opuszczającymi piec	
a. z gazami spalinowymi	Q'_{12} kcal $a'_{12}^{\text{‰}}$
b. z gazami wydzielającymi się ze wsadu	Q''_{12} kcal $a''_{12}^{\text{‰}}$
c. z gazami uchodzącymi przez otwory w ściankach	Q'''_{12} kcal $a'''_{12}^{\text{‰}}$
8. Straty ciepła na ogrzanie obmurza	Q_{13} kcal $a_{13}^{\text{‰}}$
9. Straty ciepła w wodzie chłodzącej	Q_{14} kcal $a_{14}^{\text{‰}}$
10. Straty ciepła do otoczenia	Q_{15} kcal $a_{15}^{\text{‰}}$
a. przez przewodnictwo obmurza Q'_{15}	
b. wskutek promieniowania przez otwarte drzwiczki pieca Q''_{15}	
Razem	Q_{rozch} kcal 100%

Powyższy schemat bilansu cieplnego ma charakter ogólny. Niektóre jego pozycje zarówno po stronie przychodu, jak i rozchodu mogą nie figurować w bilansach cieplnych niektórych pieców, natomiast w innych przypadkach trzeba wprowadzać do bilansu pozycje dodatkowe. Na przykład w instalacjach piecowych zaopatrzonych w kocioł parowy po stronie przychodu należy uwzględnić ciepło doprowadzone z wodą, a po stronie rozchodu — ciepło zawarte w wytworzonej parze.

Rozpatrzmy szczegółowiej poszczególne pozycje bilansu cieplnego.

1. Ciepło doprowadzone z paliwem w ilości Q_1 kcal składa się z ciepła Q_1' , które może się wydzielić w piecu przy całkowitym i zupełnym spalaniu paliwa i ciepła Q_1'' zawartego w paliwie wskutek tego, że jego temperatura jest zwykle wyższa od 0°C .

Ilość ciepła, która może się wydzielić przy spalaniu paliwa, oblicza się zwykle ze wzoru

$$Q_1' = G_{\text{pal}} \cdot W \quad [\text{III-32}]$$

gdzie: G_{pal} — ilość doprowadzonego paliwa w kg,
 W — wartość opałowa paliwa w kcal/kg.

Wartość opałową paliwa W można ustalić, przeprowadzając odpowiednie badania laboratoryjne, albo obliczyć ze wzorów empirycznych.

Do wzorów najczęściej stosowanych do obliczenia wartości opałowej paliw stałych (głównie węgla kamiennego i koksu) należy wzór opracowany przez związek inżynierów niemieckich (VDJ)

$$W = 81 C + 290 \left(H - \frac{1}{8} O \right) + 25 S - 6 H_2O \text{ kcal/kg} \quad [\text{III-33}]$$

oraz wzór znanego chemika rosyjskiego D. I. Mendelejewa

$$W = 81 C + 300 H - 26 (O - S) - 6 (9 H + H_2O) \text{ kcal/kg} \quad [\text{III-34}]$$

gdzie C, H, O, S i H₂O oznaczają procentowe zawartości odpowiednich składników w paliwie.

Ciepło fizyczne paliwa Q_1'' oblicza się ze wzoru

$$Q_1'' = G_{pal} \cdot c_{pal} \cdot t_{pal} \text{ kcal} \quad [\text{III-35}]$$

gdzie: c_{pal} — ciepło właściwe paliwa w kcal/kg · °C,
 t_{pal} — temperatura paliwa w °C.

Ciepło właściwe paliwa stałego zależy od rodzaju paliwa i dla suchego koksu wynosi ok. 0,20 kcal/kg · °C, dla suchego węgla kamiennego — od 0,27 do 0,31 kcal/kg · °C i dla suchego węgla brunatnego — ok. 0,34 kcal/kg · °C. Dla paliw gazowych ciepło właściwe oblicza się jako średnie ciepło właściwe mieszaniny gazów wchodzących w skład paliwa.

Temperatura paliwa stałego t_{pal} jest zwykle równa temperaturze otoczenia, natomiast temperatura paliwa gazowego może być wysoka, ponieważ paliwo gazowe w wielu przypadkach przed spalaniem jest podgrzewane, jak to się dzieje na przykład w piecach z regeneratorami.

Jeżeli piece są opalane paliwem stałym, to Q_1'' jest stosunkowo małe, przeszło tysiąc razy mniejsze od Q_1' , ponieważ iloczyn $c_{pal} \cdot t_{pal}$ jest przeszło tysiąc razy mniejszy od wartości opałowej W. Tłumaczy się tym, dlaczego w bilansach cieplnych pieców ogrzewanych paliwem stałym i ciekłym ciepło fizyczne paliwa Q_1'' jest często pomijane.

2. Ciepło doprowadzone z powietrzem Q_2 oblicza się ze wzoru

$$Q_2 = G_{pow} \cdot c_{pow} \cdot t_{pow} \text{ kcal} \quad [\text{III-35a}]$$

gdzie: G_{pow} — masa powietrza w kg,
 c_{pow} — średnie ciepło właściwe w kcal/kg · °C,
 t_{pow} — temperatura powietrza w °C.

Masa G_{pow} określa się na podstawie bilansu materiałowego pieca. Temperatura powietrza t_{pow} równa się temperaturze otoczenia albo gdy jest ono ogrzewane w rekuperatorach lub regeneratorach, t_{pow} ustala się bezpośrednio w czasie pomiarów.

3. Ciepło zawarte w doprowadzanych surowcach Q_3 oblicza się ze wzoru

$$Q_3 = \sum G_{sur} \cdot c_{sur} \cdot t_{sur} \text{ kcal} \quad [\text{III-35b}]$$

gdzie: G_{sur} — masa surowca w kg,
 c_{sur} — ciepło właściwe w kcal/kg · °C,
 t_{sur} — temperatura surowców w °C,

albo gdy jeden składnik, lub więcej wprowadza się do pieca w stanie roztopionym, oblicza się ze wzoru

$$Q_3 = \sum G_{sur} \cdot I_{sur} \text{ kcal} \quad [\text{III-36}]$$

gdzie I_{sur} oznacza entalpię surowca w kcal/kg.

4. Ciepło zawarte w urządzeniach pomocniczych Q_4 oblicza się ze wzoru

$$Q_4 = \Sigma G_{urz} \cdot c_{urz} \cdot t_{urz} \text{ kcal} \quad [\text{III-35c}]$$

gdzie: G_{urz} — masa urządzenia w kg,
 c_{urz} — ciepło właściwe w kcal/kg \cdot $^{\circ}\text{C}$,
 t_{urz} — temperatura urządzeń pomocniczych w $^{\circ}\text{C}$.

Do urządzeń pomocniczych należą wózki w piecach tunelowych, tygły i donice w piecach tyglowych, kapsle i muflę w piecach do wypalania porcelany itp. Zwykle ich temperatura jest równa temperaturze otoczenia.

5. Efekt cieplny reakcji egzotermicznych Q_5 . W wysokich temperaturach panujących w piecach zachodzą w ogrzewanych materiałach różnego rodzaju przemiany fizyczne i reakcje chemiczne, związane z wydzielaniem (reakcje egzotermiczne) lub pochłanianiem ciepła (reakcje endotermiczne). Jeżeli proces technologiczny zachodzący w piecu jest dobrze poznany, to zwykle są również znane efekty cieplne przemian fizycznych i reakcji chemicznych. Można je więc dla poszczególnych reakcji łatwo ustalić przy pomocy specjalnych obliczeń termochemicznych na podstawie danych technologicznych.

Przy sporządzaniu bilansu cieplnego wartość sumarycznego efektu cieplnego przemian i reakcji egzotermicznych (rekrytalizacja, reakcje utleniania, tworzenia się żużli i złożonych związków) umieszcza się w przychodzie, a wartość efektu cieplnego przemian i reakcji endotermicznych (topnienie, reakcje rozkładu) — w rozchodzie.

Często dla uproszczenia lub jeżeli przemiany fizyczne i reakcje chemiczne nie są dostatecznie poznane, ustala się sumaryczny efekt cieplny wszystkich przemian i reakcji zarówno egzo-, jak i endotermicznych, i jeżeli jest on dodatni, uwzględnia się go w przychodzie, a jeżeli jest ujemny — w rozchodzie.

Jeżeli w piecu przebiega kilka reakcji egzo- i endotermicznych, to sumaryczny efekt cieplny najprościej można obliczyć przez zsumowanie entalpii tworzenia się substratów i produktów. W ten sposób można ująć zarówno efekty cieplne reakcji, jak i przemian fazowych.

6. Ciepło odprowadzone w produktach Q_6 oblicza się albo ze wzoru

$$Q_6 = G_{pr} \cdot c_{pr} \cdot t_{pr} \text{ kcal} \quad [\text{III-35d}]$$

gdzie: G_{pr} — masa produktów w kg,
 c_{pr} — ciepło właściwe w kcal/kg \cdot $^{\circ}\text{C}$,
 t_{pr} — temperatura produktów w $^{\circ}\text{C}$,

albo gdy produkty obróbki cieplnej są wyprowadzane z pieca w stanie płynnym, stosuje się wzór

$$Q_6 = G_{pr} \cdot I_{pr} \text{ kcal} \quad [\text{III-36a}]$$

gdzie I_{pr} oznacza entalpię produktów.

Entalpię ciał ciekłych z dostateczną do celów technicznych dokładnością można obliczyć ze wzoru

$$I_{pr} = C_{pr} \cdot t_{pr} + u_{pr} \text{ kcal/kg} \quad [\text{III-37}]$$

gdzie u_{pr} oznacza ciepło topnienia w kcal/kg.

Ciepło topnienia stali wynosi $u_{st} = 65$ kcal/kg, żeliwa $u_{zel} = 34$ kcal/kg, miedzi $u_m = 42$ kcal/kg, aluminium $u_{al} = 90$ kcal/kg i żużła (szlaki) $u_z = 50$ kcal/kg.

7. Ciepło odprowadzone w odpadkach Q_7 oblicza się ze wzoru

$$Q_7 = \Sigma G_{odp} \cdot c_{odp} \cdot t_{odp} \text{ kcal} \quad [\text{III-35e}]$$

gdzie: G_{odp} — masa odpadków w kg,

c_{odp} — ciepło właściwe odpadków w kcal/kg \cdot $^{\circ}\text{C}$,

t_{odp} — temperatura odpadków w $^{\circ}\text{C}$,

albo gdy jeden lub więcej odpadków są odprowadzone z pieca w stanie płynnym (np. żużel), — ze wzoru

$$Q_7 = \Sigma G_{odp} \cdot I_{odp} \text{ kcal} \quad [\text{III-36b}]$$

gdzie I_{odp} oznacza entalpię odpadków.

8. Efekt cieplny reakcji endotermicznych Q_8 ustala się w sposób analogiczny jak efekt cieplny Q_5 reakcji egzotermicznych, tj. przy pomocy specjalnych obliczeń termochemicznych na podstawie danych technologicznych.

9. Ciepło odprowadzone w urządzeniach pomocniczych Q_9 oblicza się ze wzoru

$$Q_9 = \Sigma G_{urz} \cdot c_{urz} \cdot t_{urz} \text{ kcal} \quad [\text{III-35f}]$$

gdzie: G_{urz} — masa urządzeń w kg,

c_{urz} — ciepła właściwe materiałów, z których są wykonane urządzenia pomocnicze w kcal/kg \cdot $^{\circ}\text{C}$,

t_{urz} — temperatura w $^{\circ}\text{C}$.

10. Straty wskutek niezupełnego spalania Q_{10} . Niezupełnym spalaniem nazywa się spalanie węgla na CO. Efekt cieplny w tym przypadku jest o 5670 kcal/kg mniejszy niż przy spalaniu węgla na CO₂. Ilość ciepła straconego wskutek niezupełnego spalania można obliczyć przy paliwie stałym ze wzoru.

$$Q_{10} = 56,7 \cdot C \cdot \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \cdot G_{pal} \text{ kcal} \quad [\text{III-38}]$$

gdzie: C — zawartość węgla w paliwie po potrąceniu strat węgla w żużlu w % wag.

CO i CO₂ — zawartość tlenku i dwutlenku węgla w gazach spalinowych w % obj.

Straty ciepłe wskutek niezupełnego spalania zachodzą również wtedy, gdy w gazach spalinowych znajdują się wodór i metan, które wchodząc w skład paliwa w ogóle nie wzięły udziału w procesie spalania.

Jeżeli gazy opuszczające piec oprócz tlenku węgla zawierają również wodór, to straty wskutek niezupełnego spalania oblicza się ze wzoru

$$Q_{10} = (30,5 \text{ CO} + 25,7 \text{ H}_2) V_g \text{ kcal} \quad \text{[III-39]}$$

gdzie: H₂ — zawartość wodoru w gazach odlotowych w % obj.,

V_g — całkowita objętość gazów w Nm³.

Przy paliwie gazowym straty ciepła wskutek niezupełnego spalania oblicza się ze wzoru

$$Q_{10} = 30,4 (\text{CO}'' + \text{CO}'' + \text{CH}_4'' + 2 \text{C}_2\text{H}_4'') \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \cdot V_p \text{ kcal} \quad \text{[III-40]}$$

gdzie CO₂'', CO'', CH₄'', i 2 C₂H₄'', są to odpowiednio zawartości dwutlenku węgla, tlenku węgla, metanu i etylenu w paliwie w % obj.,

V_p — objętość paliwa gazowego w Nm³.

11. Straty wskutek niecałkowitego spalania Q₁₁ polegają na tym, że część węgla nie spala się do końca, lecz — pozostając w żużlu lub przesypany się do popielnika — jest usuwana z paleniska wraz z żużlem i popiołem. Oczywiście, przy tym nie wydziela się w palenisku odpowiednia ilość ciepła, która jest właśnie stratą powstałą wskutek niecałkowitego spalania. Stratę powyższą oblicza się ze wzoru

$$Q_{11} = 8,1 \cdot A \frac{s}{100 - s} G_{pal} \text{ kcal} \quad \text{[III-41]}$$

gdzie: A — zawartość popiołu w paliwie w % wag.,

s — zawartość węgla w suchym popiele i żużlu w % wag.

12. Straty ciepła z gazami opuszczającymi piec składają się z ciepła odprowadzanego z gazami spalinowymi Q₁₁, z gazami wydzielającymi się ze wsadu Q₁₂'', i gazami opuszczającymi piec przez otwory w ścianach (np. przez otwarte drzwiczki) Q₁₂'''.

Stratę ciepła z gazami spalinowymi Q₁₂'', jeżeli bilans materiałowy jest sporządzony w molach, oblicza się ze wzoru

$$Q_{12}'' = m_{sp} \cdot c_{p \text{ sp}} \cdot t_{sp} \cdot G_{pal} \text{ kcal} \quad \text{[III-42]}$$

gdzie: m_{sp} — ilość moli gazów spalinowych wytwarzających się przy spaleniu 1 kg paliwa,

c_{p sp} — średnie ciepło właściwe gazów spalinowych w kcal/mol · °C,

t_{sp} — temperatura gazów spalinowych opuszczających piec w °C.

Jeżeli bilans materiałowy jest sporządzony w jednostkach wagowych, to straty z gazami spalinowymi oblicza się ze wzoru

$$Q'_{12} = G_{sp} \cdot c_{p\ sp} \cdot t_{sp} \text{ kcal} \quad [\text{III-35g}]$$

gdzie: G_{sp} — masa gazów spalinowych w kg,

$c_{p\ sp}$ — średnie ciepło właściwe gazów spalinowych w kcal/kg · °C.

W przypadku spalania paliwa gazowego straty powyższe oblicza się ze wzoru

$$Q'_{12} = V_{sp} \cdot c_{p\ sp} \cdot t_{sp} \text{ kcal} \quad [\text{III-43}]$$

gdzie: V_{sp} — objętość spalin w Nm³,

c_p — ciepło właściwe spalin w kcal/m³ · °C.

Ilość moli gazów spalinowych opuszczających piec ustala się przy sporządzaniu bilansu materiałowego, średnie zaś ciepło molowe tych gazów oblicza się ze wzoru

$$c_{p\ sp} = \frac{m_{CO_2} \cdot c_p\ CO_2 + m_{CO} \cdot c_p\ CO + m_{H_2O} \cdot c_p\ H_2O + m_{N_2} \cdot c_p\ N_2 + m_{O_2} \cdot c_p\ O_2 + \dots}{m_{CO_2} + m_{CO} + m_{H_2O} + m_{N_2} + m_{O_2} + m_{SO_2} + \dots} + \frac{m_{SO_2} \cdot c_p\ SO_2 + \dots}{m_{CO_2} + m_{CO} + m_{H_2O} + m_{N_2} + m_{O_2} + m_{SO_2} + \dots} \quad [\text{III-44}]$$

gdzie: m_{CO_2} , m_{CO} , m_{H_2O} itd. — ilość moli odpowiednich składników w gazach spalinowych,

$c_p\ CO_2$, $c_p\ CO$, $c_p\ H_2O$ itd. — średnie ciepła molowe odpowiednich gazów w kcal/kmol · °C.

Molowe średnie ciepła właściwe różnych gazów są podane w tabl. III-2.

W podobny sposób oblicza się średnie ciepło właściwe gazów spalinowych, gdy ich ilość i skład są podane w m³ lub w jednostkach wagowych. W ostatnim przypadku wartości średnich ciepł właściwych poszczególnych gazów przyjmuje się z tabl. III-3.

Średnie ciepło właściwe w kcal/m³ · °C można obliczyć, dzieląc wartości ciepła właściwego w kcal/mol · °C z tabl. III-2 przez 22,4 m³/kmol.

Temperaturę gazów odlotowych mierzy się bezpośrednio w czasie badań pieca albo gdy bilans cieplny układa się dla pieca projektowanego, ustala się ją na podstawie założeń technicznych i technologicznych.

Ilość ciepła Q , straconą z gazami wydzielającymi się ze wsadu, oblicza się przy pomocy tych samych wzorów co ilość ciepła, straconą ze spalinami, przy czym ilość i skład gazów wydzielających się ze wsadu ustala się na podstawie obliczeń technologicznych. Ciepło Q''_{12} stracone z gazami opuszczającymi piec przez otwory w jego ścianach równa się

$$Q''_{12} = V_{sek} \cdot \tau \cdot c_{p\ g} \cdot t_{p\ g} \quad [\text{III-45}]$$

gdzie: V_{sek} — ilość gazów wypływających przez otwory w m³/sek,

τ — czas, w ciągu którego trwa wpływ w sek,

$c_{p\ g}$ i $t_{p\ g}$ — odpowiednio ciepło właściwe w kcal/m³ · °C i temperatura wypływających gazów w °C.

Tablica III-2

ŚREDNIE CIEPŁO WŁAŚCIWE GAZÓW, kcal/mol °C

t, °C	H ₂	N ₂	O ₂	CO	Po- wie- trze	H ₂ O	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	t, °C
0	6,86	6,96	6,99	6,96	6,94	7,98	8,61	8,24	10,02	10,13	0
100	6,92	6,97	7,05	6,97	6,96	8,03	9,17	8,66	11,27	11,00	100
200	6,95	7,00	7,15	7,00	7,01	8,12	9,65	9,40	12,46	11,67	200
300	6,97	7,04	7,26	7,06	7,06	8,22	10,06	10,10	13,55	12,25	300
400	6,98	7,09	7,38	7,12	7,13	8,34	10,40	10,77	14,57	12,70	400
500	6,99	7,15	7,49	7,19	7,20	8,47	10,75	11,41	15,49	13,10	500
600	7,01	7,21	7,59	7,27	7,27	8,60	11,03	12,03	16,33	13,47	600
700	7,03	7,27	7,68	7,34	7,34	8,74	11,28	12,62	17,03	13,80	700
800	7,06	7,35	7,77	7,43	7,42	8,89	11,50	13,17	17,90	14,12	800
900	7,09	7,42	7,85	7,50	7,49	9,04	11,70	13,68	18,46	14,40	900
1000	7,12	7,49	7,92	7,57	7,56	9,18	11,88	14,17	19,08	14,67	1000
1100	7,15	7,56	7,98	7,64	7,62	9,32	12,05	16,03	28,04	26,03	M*
1200	7,20	7,62	8,04	7,70	7,68	9,45	12,19				
1300	7,24	7,67	8,11	7,76	7,73	9,58	12,32				
1400	7,28	7,73	8,16	7,81	7,78	9,72	12,45				
1500	7,32	7,78	8,20	7,85	7,84	9,84	12,56				
1700	7,40	7,86	8,28	7,94	7,92	10,09	12,75				
1900	7,49	7,94	8,38	8,02	7,99	10,30	12,92				
2100	7,57	8,01	8,45	8,09	8,06	10,52	13,06				
2300	7,66	8,08	8,52	8,15	8,12	10,71	13,19				
2500	7,74	8,14	8,59	8,21	8,18	10,87	13,30				

M — jest to ciężar molowy

Tablica III-3

ŚREDNIE CIEPŁO WŁAŚCIWE GAZÓW W TEMPERATURZE

od 0 do t °C w $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$

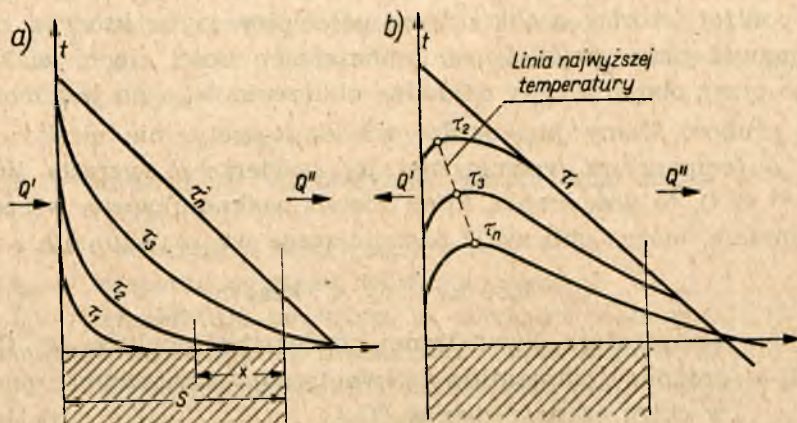
Tempera- tura gazów t °C	$C_{pm} / 0 \text{ w } \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$										
	CO ₂	N ₂	H ₂ O	O ₂	H ₂	CO	SO ₂	Suche powie- trze	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
0	0,196	0,248	0,439	0,218	3,403	0,248	0,145	0,240	0,514	0,357	0,389
200	0,219	0,250	0,447	0,223	3,448	0,250	0,158	0,242	0,586	0,444	0,448
400	0,236	0,253	0,459	0,231	3,463	0,254	0,169	0,246	0,671	0,519	0,487
600	0,251	0,257	0,474	0,237	3,478	0,260	0,177	0,251	0,750	0,582	0,517
800	0,261	0,262	0,490	0,243	3,503	0,265	0,183	0,256	0,821	0,638	0,542
1000	0,270	0,267	0,506	0,248	3,532	0,270	0,187	0,261	0,883	0,680	0,563
1200	0,277	0,272	0,520	0,251	3,572	0,275	0,191	0,265			
1400	0,283	0,276	0,535	0,255	3,612	0,279	0,194	0,269			
1600	0,288	0,279	0,548	0,258	3,652	0,282	0,196	0,272			
1800	0,292	0,282	0,562	0,260	3,696	0,285	0,198	0,275			
2000	0,295	0,285	0,573	0,263				0,277			
2200	0,298	0,287	0,584	0,265				0,279			
2400	0,301	0,289	0,594	0,268				0,281			

Objętość gazów wypływających przez otwory w piecu obliczamy ze wzorów [II-61] i [II-63]. Pierwszy z nich stosuje się do otworów umieszczonych przy trzonie pieca, drugi zaś — do otworów znajdujących się powyżej trzona. Trzeba jednak pamiętać, że wzory [II-61] i [II-63] wyznaczają objętość rzeczywistą gazów V , odpowiadającą ich temperaturze, natomiast we wzorze [III-45] V_{sek} określa się objętość gazów w warunkach normalnych, wobec czego

$$V_{sek} = V \frac{273}{273 + t_g}$$

Czas τ , w ciągu którego trwa wypływ, ustala się podczas badań pieca w czasie jego pracy albo oblicza się dla pieca projektowanego na podstawie założeń technologicznych i technicznych.

13. Straty ciepła na ogrzanie obmurza Q_{13} oblicza się tylko w przypadku pieców o działaniu okresowym. Jeżeli piec pracuje



Rys. III-7. Wykresy zmian temperatury obmurza: a) przy ogrzewaniu, b) przy oziębianiu

w sposób ciągły, to $Q_{13} = 0$, ponieważ jego obmurze znajduje się wtedy w stanie równowagi cieplnej. (Stan równowagi cieplnej osiąga obmurze w momencie, gdy ilość ciepła, którą otrzymuje przez powierzchnię wewnętrzną, równa się ilości ciepła, którą ono traci przez powierzchnię zewnętrzną).

Przy okresowej pracy pieca temperatura wewnętrznej powierzchni ściany po rozpaleniu pieca stopniowo wzrasta, zwiększa się również temperatura wewnątrz ściany. Zmiany temperatury w ścianie w miarę trwania ogrzewania są podane w sposób graficzny na rys. III-7 w postaci krzywych przedstawiających rozkład temperatur wewnątrz ściany co pewien okres czasu w momentach τ_1 , τ_2 , τ_3 i τ_n .

Ilość ciepła pochłoniętego przez ścianę w czasie τ godzin oblicza się ze wzoru

$$Q_{13} = V_{ob} \cdot \gamma_{ob} \cdot c_{ob} \cdot \Delta t_{ob} \text{ kcal} \quad [\text{III-47}]$$

gdzie: V_{ob} — objętość obmurza w m^3 ,
 γ_{ob} — ciężar obmurza w kg/m^3 ,
 c_{ob} — ciepło właściwe obmurza w $\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$,
 Δt_{ob} — przyrost średniej temperatury obmurza w czasie τ godzin w $^\circ\text{C}$.

Z powyższego równania wynika, że dla obliczenia ciepła pobranego przez obmurze Q_{13} trzeba znać przyrost średniej temperatury obmurza w czasie τ . Dokładne jednak określenie przyrostu średniej temperatury obmurza Δt_{ob} w dowolnym odcinku czasu τ w ogólnym przypadku nie jest możliwe. Przybliżone obliczenia wykonuje się metodą graficzną.

Liczne badania ruchu ciepła wewnątrz obmurza pieców przemysłowych pozwoliły na wyciągnięcie kilku wniosków i wyprowadzenie podanych poniżej wzorów o charakterze półempirycznym, którymi można się posługiwać przy przybliżonych obliczeniach ilości ciepła zaakumulowanego przez obmurze, gdy dokładne obliczenie Δt_{ob} nie jest możliwe.

Jeżeli grubość ściany jest bardzo wielka (teoretycznie nieskończenie wielka), a temperatura wewnętrznej jej powierzchni wzrasta liniowo ($t_w = t_0 + n \cdot \tau$), to ilość ciepła, która została zaakumulowana w czasie τ przez obmurze, można obliczyć z następującego wzoru Schmidta:

$$Q = 0,55 t_w \sqrt{t_{sr} \cdot \tau} \text{ kcal}/\text{m}^2 \quad [\text{III-48}]$$

gdzie: t_w — temperatura wewnętrznej powierzchni obmurza w $^\circ\text{C}$,
 t_{sr} — średnia temperatura wewnętrznej powierzchni obmurza w ciągu czasu τ godz w $^\circ\text{C}$.

Głębokość x , do której dochodzi wzrost temperatury ściany, mierzona, jak pokazano na rys. III-7, od jej powierzchni zewnętrznej wynosi

$$x = 0,17 \cdot 10^{-3} \cdot t_{sr} \cdot \sqrt{\tau} \quad [\text{III-49}]$$

Przyrost temperatury wewnątrz ściany o skończonej grubości s mm przez okres czasu, równy τ godzin odbywa się zupełnie tak samo jak w ścianie o grubości nieskończenie wielkiej, jeżeli okres ten jest mniejszy od

$$10^6 \cdot \tau \leq 175 s^2 \text{ godz} \quad [\text{III-50}]$$

Ze wzoru tego wynika, że gdy

$s = 115 \text{ mm}$	$\tau = 2,3 \text{ godz}$
$s = 230 \text{ mm}$	$\tau = 9,2 \text{ godz}$
$s = 350 \text{ mm}$	$\tau = 22 \text{ godz}$
$s = 470 \text{ mm}$	$\tau = 39 \text{ godz}$

Biorąc powyższe pod uwagę, wzór [III-49] można stosować również do obliczenia ilości ciepła pobranego przez ścianę o skończonej grubości s pod warunkiem, że $s > x$ (rys. III-7).

Jeżeli grubości ścian pieca i sklepienia nie są jednakowe lub jeżeli nie są jednakowe ich temperatury, to ciepło Q_{13} zaakumulowane przez obmurze oblicza się dla każdej ściany i sklepienia (lub ich części) oddzielnie, a następnie uzyskane wyniki sumuje się.

14. Straty ciepła Q_{14} w wodzie chłodzącej części metalowe i obmurze pieca oblicza się ze wzoru

$$Q_{14} = G_w \cdot (t'' - t') \text{ kcal} \quad [\text{III-51}]$$

gdzie: G_w — zużycie wody chłodzącej w kg/godz,

t' i t'' — odpowiednio początkowa i końcowa temperatura wody chłodzącej w $^{\circ}\text{C}$.

15. Straty ciepła do otoczenia Q_{15} powstają na skutek przewodzenia ciepła przez ściany pieca i oddawania go otaczającemu powietrzu oraz na skutek promieniowania ciepła z pieca na zewnątrz przez otwarte okna załadunkowe, wyładunkowe i inne.

Przy ustalonym ruchu ciepła straty na skutek przenikania przez obmurze oblicza się ze wzoru

$$Q'_{15} = k \cdot F (t_g - t_p) \text{ kcal} \quad [\text{III-52}]$$

gdzie: k — sumaryczny współczynnik przenikania ciepła w $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^{\circ}\text{C}$,

F — powierzchnia ścian pieca w m^2 ,

t_g — temperatura gazów wewnątrz pieca w $^{\circ}\text{C}$,

t_p — temperatura powietrza na zewnątrz pieca w $^{\circ}\text{C}$.

Sumaryczny współczynnik przenikania ciepła k przez ścianę składającą się z kilku warstw różnych materiałów (np. z cegły zwykłej i z cegły ogniotrwałej) oblicza się, jak wiadomo, ze wzoru

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2} \text{ m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^{\circ}\text{C/kcal} \quad [\text{III-53}]$$

gdzie: α_1 — cząstkowy współczynnik przenikania ciepła od gorących gazów do wewnętrznej powierzchni obmurza w $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^{\circ}\text{C}$,

$\delta_1, \delta_2 \dots \delta_n$ — grubości poszczególnych warstw w m,

$\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$ — przewodnictwa właściwe (współczynniki przewodnictwa ciepła) materiałów, z których są wykonane poszczególne warstwy ściany, w $\text{kcal/m} \cdot \text{godz} \cdot ^{\circ}\text{C}$,

α_2 — cząstkowy współczynnik przenikania ciepła od zewnętrznej powierzchni obmurza do powietrza otaczającego piec.

Można go obliczać z następującego wzoru empirycznego:

$$\alpha_2 = 8 + 0,05 t_z \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^{\circ}\text{C} \quad [\text{III-54}]$$

gdzie t_z oznacza temperaturę zewnętrznej powierzchni obmurza.

Współczynniki przewodnictwa ciepła λ dla niektórych materiałów są podane w tabl. III-4.

Temperatury na powierzchniach zetknięcia się poszczególnych warstw ze sobą oblicza się ze wzorów

$$t' = t_w - Q'_{15} \cdot \frac{\delta_1}{\lambda_1} \cdot \frac{1}{F} \text{ } ^\circ\text{C} \quad [\text{III-55}]$$

$$t'' = t_w - Q'_{15} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) \frac{1}{F} \text{ } ^\circ\text{C} \text{ itd.} \quad [\text{III-56}]$$

gdzie: t' , t'' ... — temperatury na powierzchniach zetknięcia się pierwszej warstwy z drugą, drugiej z trzecią itd., w $^\circ\text{C}$,

t_w — temperatura wewnętrznej powierzchni obmurza w $^\circ\text{C}$.

Straty ciepła Q'_{15} na skutek przewodzenia ścian można z dostateczną do celów technicznych dokładnością obliczać również przy pomocy wy-

kresu podanego na rys. III-8.

Tablica III-4
WSPÓLCZYNNIK PRZEWODNICTWA CIEPŁA MATERIAŁÓW CERAMICZNYCH

Materiał	Współczynnik przewodnictwa ciepła w $\frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C}}$
Cegła szamotowa	$0,6 + 0,00055 \cdot t$
Cegła dynasowa	$0,9 + 0,00080 \cdot t$
Cegła magnezytowa	$3,7 + 0,00044 \cdot t$
Cegła budowlana	$0,4 + 0,00044 \cdot t$
Cegła izolacyjna o ciężarze właściwym $0,9-1,0 \frac{\text{kG}}{\text{cm}^3}$	$0,25 + 0,00055 \cdot t$

Na wykresie tym przedstawiono zależność pomiędzy ilością ciepła q straconą przez 1 m^2 powierzchni obmurza w ciągu 1 sek a grubością ściany δ i temperaturami t_w oraz t_z na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni obmurza.

Dla wyjaśnienia, jak należy posługiwać się powyższym wykresem, obliczmy straty ciepła przez przewodzenie ściany o grubości $\delta = 0,23 \text{ m}$ wykonanej z cegły szamotowej, dla

której $\lambda = 1 \text{ kcal/m} \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C}$, jeżeli temperatura jej wewnętrznej powierzchni wynosi $t = 1200^\circ\text{C}$.

W tym celu obliczamy opór termiczny ściany $r = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0,23}{1} = 0,23 \text{ m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$ i odczytujemy z wykresu (górną linią przerywaną), że $t_z = 225^\circ\text{C}$ oraz że straty ciepła q na 1 m^2 obmurza wynoszą

$$q = 1,2 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{sek} = 4320 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{godz}$$

W przypadku gdy obmurze składa się z kilku warstw, np. z warstwy cegły szamotowej ($\lambda = 1 \text{ kcal/m} \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C}$) o grubości $\delta_1 = 0,24 \text{ m}$ i warstwy cegły izolacyjnej ($\lambda = 0,15 \text{ kcal/m} \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C}$) o grubości $\delta_2 = 0,12 \text{ m}$ jego opór termiczny wynosi

$$r = \sum \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0,24}{1} + \frac{0,12}{0,15} = 1,04 \text{ m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$$

a temperatura na zewnętrznej powierzchni obmurza, jak wynika z wy-

kresu (rys. III-8), równa się $t_z = 93^\circ\text{C}$ (przy $t_w = 1200^\circ\text{C}$), straty ciepłne zaś przez przewodzenie są w tym przypadku mniejsze i wynoszą tylko

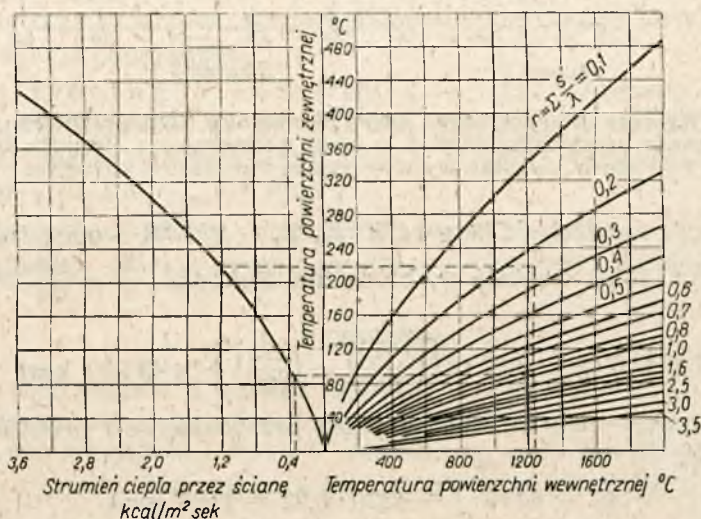
$$q = 0,3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{sek} = 1080 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{godz}$$

Znając ilość ciepła straconego na skutek przewodzenia przez 1 m^2 powierzchni zewnętrznej obmurza, można łatwo obliczyć ilość ciepła Q'_{15} straconego przez cały piec.

Ilość ciepła straconego na skutek promieniowania energii na zewnątrz przez otwory w obmurzu pieca Q''_{15} oblicza się z następującego wzoru opartego na prawie Stefana—Boltzmann'a:

$$Q''_{15} = 4,96 \psi \cdot f \cdot \tau \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_z}{100} \right)^4 \right] \text{ kcal} \quad [\text{III-57}]$$

gdzie: T_w i T_z — temperatury wewnątrz i na zewnątrz pieca w $^\circ\text{K}$,
 f — powierzchnia otwartych okien i otworów w m^2 ,
 τ — czas, w ciągu którego są otwarte okna i otwory, w godz.,
 ψ — współczynnik poprawkowy uwzględniający pochłanianie części promieni przez boczne powierzchnie otworów w ścianach.



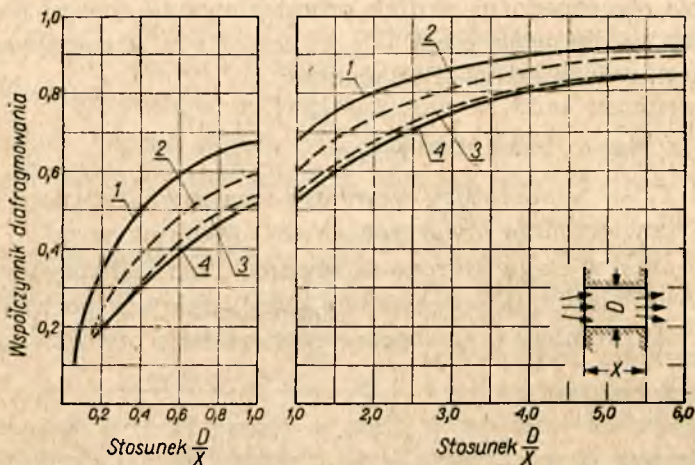
Rys. III-8. Wykres strat ciepłych do otoczenia

Współczynnik poprawkowy ψ , który nazywany jest czasami współczynnikiem diafragmowania, zależy, jak wykazały badania, od wymiarów poprzecznych otworu i grubości ściany. Powyższa zależność jest przedstawiona na rys. III-9.

Straty ciepła na skutek promieniowania przez otwarte okna w ścianach obmurza przy częstym ich otwieraniu mogą stanowić dość dużą pozycję w bilansie cieplnym pieca. Ażeby ocenić wielkość tych strat, obliczmy ilość ciepła wypromieniowanego przez otwór o wymiarach

$600 \times 450 \text{ mm}^2$ w ścianie o grubości $\delta = 230 \text{ mm}$, jeżeli w piecu panuje temperatura $t = 1200^\circ\text{C}$, a przewodnictwo właściwe ściany $\lambda = 1 \text{ kcal/m} \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C}$ i porównajmy otrzymany wynik z ilością ciepła straconego na skutek przewodzenia przez taką samą powierzchnię obmurza jak powierzchnia tego otworu.

Ilość ciepła Q'' wypromieniowanego przez powyższy otwór w ciągu 1 godz obliczymy ze wzoru [III-58], biorąc pod uwagę, że $f = 600 \times 450 =$



Rys. III-9. Wykresy współczynnika poprawkowego ψ (współczynnika diafragmowania: 1 — otwór prostokątny długi, 2 — otwór prostokątny o stosunku bloków 1:2, 3 — otwór kwadratowy, 4 — otwór o przekroju okrągłym

$= 0,27 \text{ m}^2$, $T_w = 1200 + 273 = 1473 \text{ }^\circ\text{K}$, $T_z = 273 \text{ }^\circ\text{K}$ i odczytując z wykresu na rys. III-9 wartość ψ , która dla stosunku $\frac{D}{x} = \frac{450}{230} \cong 2$ równa się 0,7

$$Q'' = 4,96 \cdot 0,7 \cdot 0,27 \cdot 1 \left[\left(\frac{1473}{100} \right)^4 - \left(\frac{273}{100} \right)^4 \right] \cong 43 \text{ 900 kcal}$$

Natomiast ilość ciepła, stracona przez przewodzenie i promieniowanie, wynosi tylko

$$Q' = 4320 \cdot f = 4320 \cdot 0,27 = 1166 \text{ kcal}$$

gdzie $4320 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{godz}$ jest to ilość ciepła, obliczona poprzednio, która została stracona przez 1 m^2 obmurza w ciągu 1 godz.

Porównując ze sobą Q' i Q'' , widzimy, że w przypadku rozpatrywanego przykładu ciepło wypromieniowane przez otwarte okna jest prawie 38 razy większe od ciepła straconego na skutek przewodzenia obmurza. Oczywiście, gdy temperatura w piecu jest niższa, straty na skutek promieniowania przez otwory są znacznie mniejsze. W każdym bądź razie przy projektowaniu i eksploatacji pieców przemysłowych należy specjalną uwagę zwracać na obniżenie powyższych strat, szczególnie w piecach o wysokiej temperaturze.

Dodając ciepło wypromieniowane przez otwory w piecu do ciepła straconego na skutek promieniowania obmurza, otrzymamy straty ciepła do otoczenia Q_{15} .

Dokładne ustalenie strat cieplnych do otoczenia Q_{15} nie zawsze jednak jest możliwe, ponieważ w wielu piecach (np. w piecach szybowych, tunelowych, obrotowych i innych) temperatury na wewnętrznej powierzchni obmurza i wewnątrz pieca nie są w różnych jego miejscach jednakowe. Odnosi się to również i do temperatur na powierzchni zewnętrznej pieca. W tych przypadkach straty ciepła do otoczenia oblicza się przy układaniu bilansu cieplnego jako resztę bilansową.

Bilanse cieplne pieców, oparte na pomiarach instalacji piecowej w ruchu lub (dla pieców projektowanych) na założeniach technologicznych i technicznych nie zawsze się zgadzają ze względu na nieuniknione niedokładności pomiarów i nieściśłości założeń. Niedokładność bilansu nie powinna jednak przekraczać kilku procent.

Czasami bilanse cieplne są przedstawiane graficznie w postaci wykresu Sankeya. Jeden z takich wykresów jest podany na rys. III-10.

Dla przykładu podano niżej bilanse cieplne pieca szybowego do wypalania wapna oraz paleniska, których bilanse materiałowe zostały sporządzone w punkcie poprzednim.

Bilans cieplny pieca wapiennego. W czasie pomiarów pieca w ruchu ustalono, że temperatura otoczenia wynosiła $t_0 = 18^\circ\text{C}$, temperatura gazów opuszczających piec $t_g = 300^\circ\text{C}$, temperatura tlenu wapieniowego i popiołu $t_{\text{CaO}} = 200^\circ\text{C}$.

Bilans cieplny powyższego pieca sporządzamy na podstawie jego bilansu materiałowego w przeliczeniu na 100 kg kamienia wapiennego.

A. PRZYCHÓD

1. Ciepło doprowadzone z paliwem $Q_1 = G_{pal} \cdot W + G_{pal} \cdot c_{pal} \cdot t_{pal}$

Ilość spalonego paliwa, przypadająca na 100 kg kamienia wapiennego, wynosi $G_{pal} = 9$ kg, jego zaś wartość opałową W obliczamy ze wzoru VDI [III-33].

$$W = 81 C + 290\left(H - \frac{1}{2} O\right) + 25 S - 6 H_2O = 81 \cdot 87 + 290\left(0,4 - \frac{1}{8} 1,5\right) + 25 \cdot 1,2 - 6 \cdot 2 = 7126 \text{ kcal/kg}$$

Przyjmując następnie, że temperatura paliwa równa się temperaturze otoczenia, tj. że $t_{pal} = 18^\circ\text{C}$ oraz że jego ciepło właściwe $c_{pal} = 0,20$ kcal/kg \cdot $^\circ\text{C}$ otrzymamy

$$Q_1 = 9 \cdot 7126 + 9 \cdot 0,2 \cdot 18 = 64167 \text{ kcal}$$

2. Ciepło doprowadzone z powietrzem Q_2 obliczamy ze wzoru [III-35 a], przyjmując, że $c_{pow} = 0,24$ kcal/kg \cdot $^\circ\text{C}$

$$Q_2 = G_{pow} \cdot c_{pow} \cdot t_{pow} = 119,502 \cdot 0,24 \cdot 18 = 514 \text{ kcal}$$

3. Ciepło doprowadzone z kamieniem wapiennym obliczamy ze wzoru [III-35 b], przyjmując, że jego ciepło właściwe wynosi 0,21 kcal/kg \cdot $^\circ\text{C}$

$$Q_3 = G_{sur} \cdot c_{sur} \cdot t_{sur} = 100 \cdot 0,21 \cdot 18 = 377 \text{ kcal}$$

B. ROZCHÓD

1. Ciepło odprowadzone z tlenkiem wapniowym obliczamy ze wzoru [III-35 d], przyjmując, że ciepło właściwe tlenku wapniowego wynosi 0,19 kcal/kg · °C

$$Q_4 = G_{pr} \cdot c_{pr} \cdot t_{pr} = 53,536 \cdot 0,19 \cdot 200 = 2034 \text{ kcal}$$

2. Ciepło odprowadzone z tlenkiem magnezowym obliczamy z tego samego wzoru, przyjmując, że jego ciepło właściwe wynosi 0,22 kcal/kg · °C

$$Q_5 = 0,717 \cdot 0,22 \cdot 200 = 32 \text{ kcal}$$

3. Ciepło odprowadzone z żużłem obliczamy ze wzoru [III-35 e], przyjmując, że jego ciepło właściwe wynosi 0,2 kcal/kg · °C

$$Q_6 = G_{odp} \cdot c_{odp} \cdot t_{odp} = 2,931 \cdot 0,2 \cdot 200 = 117 \text{ kcal}$$

4. Efekt cieplny reakcji endotermicznych Q_7 obliczamy, biorąc pod uwagę, że w piecu wapiennym zachodzą reakcje chemiczne rozkładu węglanów wapniowego i magnezowego oraz przemiany fizyczne odparowania wody z wilgotnego kamienia wapiennego. Uwzględniając, że ciepło rozkładu 1 kg węglanu wapniowego wynosi $q_1 = 425$ kcal/kg, a węglanu magnezowego $q_2 = 200$ kcal/kg, obliczymy efekt cieplny reakcji endotermicznych

$$Q_7 = G_{CaCO_3} \cdot q_1 + G_{MgCO_3} \cdot q_2 + 600 G_{H_2O} = 95,6 \cdot 425 + 1,5 \cdot 200 + 600 \cdot 0,5 = 41\,230 \text{ kcal}$$

5. Ciepło stracone z gazami opuszczającymi piec składa się z ciepła uniesionego przez azot, dwutlenek węgla, tlen, parę wodną i dwutlenek siarki, które uchodzą z pieca w temp. 300°C. Straty powyższe obliczamy ze wzoru

$$Q_8 = (G_{N_2} \cdot c_p N_2 + G_{CO_2} \cdot c_p CO_2 + G_{O_2} \cdot c_p O_2 + G_{H_2O} \cdot c_p H_2O + G_{SO_2} \cdot c_p SO_2) \cdot t_g$$

Podstawiając do tego wzoru ciężary poszczególnych gazów z bilansu materiałowego, a ciepła właściwe z tabl. III-3, otrzymamy

$$Q_8 = (92,196 \cdot 0,251 + 71,557 \cdot 0,229 + 6,210 \cdot 0,227 + 1,004 \cdot 0,457 + 0,216 \cdot 0,157) \cdot 300 = 12\,429 \text{ kcal}$$

6. Straty ciepła do otoczenia obliczamy jako resztę. Wynoszą one

$$Q_9 = Q_1 + Q_2 + Q_3 - (Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8) = 64167 + 514 + 377 - (2034 + 32 + 117 + 41230 + 12429) = 9216 \text{ kcal}$$

W celu nadania bilansowi cieplnemu większej przejrzystości przedstawmy go w postaci tabelki i w sposób graficzny przy pomocy wykresu Sankeya

PRZYCHÓD

1. Ciepło doprowadzone z paliwem	64167 kcal	98,6%
2. Ciepło doprowadzone z powietrzem	514 kcal	0,8%
3. Ciepło doprowadzone z kamieniem wapiennym	377 kcal	0,6%
Razem	65058 kcal	100 %

ROZCHÓD

1. Ciepło odprowadzone z tlenkiem wapniowym	2034 kcal	3,1%
2. Ciepło odprowadzone z tlenkiem magnezowym	32 kcal	0,0%
3. Ciepło odprowadzone z żużłem	117 kcal	0,2%
4. Efekt cieplny reakcji endotermicznych	41230 kcal	63,4%
5. Ciepło stracone z gazami	12429 kcal	19,2%
6. Straty ciepła do otoczenia	9216 kcal	14,1%
Razem	65058 kcal	100,0%

Wykres Sankeya sporządzony w procentach jest podany na rys. III-10. Z powyższego bilansu cieplnego można obliczyć zużycie ciepła na otrzymanie 1 kg tlenku wapniowego oraz sprawność pieca, przyjmując, że ciepło użyteczne jest to ciepło pobierane przez reakcje endotermiczne.

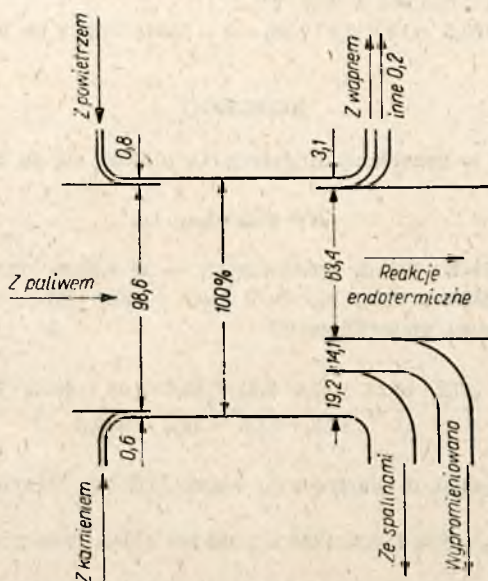
Zużycie ciepła na wytworzenie 1 kg tlenku wapniowego wynosi

$$q = \frac{64167}{53,536} = 1199 \text{ kcal/kg}$$

sprawność zaś równa się

$$\eta = \frac{41230}{64167} = 0,643$$

Bilans cieplny paleniska kotłowego. Podczas przeprowadzania pomiarów paleniska stwierdzono, że temperatura otoczenia wynosi $t_0 = 16^\circ\text{C}$, temperatura gazów spalinowych w palenisku $t_{\text{pal}} =$



Rys. III-10. Wykres Sankeya dla bilansu cieplnego pieca wapiennego

$= 1250^\circ\text{C}$. Następnie ustalono, że przez promieniowanie użyteczne zostało przekazane powierzchni ogrzewalnej kotła parowego 9% ciepła wytworzonego w palenisku.

Bilans cieplny tego paleniska układamy na podstawie jego bilansu materiałowego, sporządzonego w poprzednim punkcie w przeliczeniu na 1 kg paliwa.

PRZYCHÓD

1. Ciepło wprowadzone z paliwem Q_1 . Przy obliczeniu ciepła wprowadzanego z paliwem uwzględnimy tylko jego wartość opałową, ciepło zaś fizyczne paliwa jest

bardzo małe, więc je pominiemy. Wobec tego $Q_1 = W$. Jako rekompensatę pominiemy w rozchodzie ciepło fizyczne żuźla i popiołu, które jest również bardzo małe w porównaniu z innymi pozycjami bilansu.

Wartość opałową paliwa obliczamy ze wzoru [III-33]

$$W = 8100 C + 29000(H - \frac{1}{8} O) + 2500 S - 600 H_2O = 8100 \cdot 0,6986 + 29000(0,0447 - \frac{1}{8} \cdot 0,1195) + 2500 \cdot 0,0156 - 600 \cdot 0,0711 = 6519 \text{ kcal}$$

2. Ciepło wprowadzone z powietrzem Q_2 obliczymy ze wzoru

$$Q_2 = (m_{N_2} \cdot c_p N_2 + m_{O_2} \cdot c_p O_2 + m_{H_2O} \cdot c_p H_2O) t_0$$

gdzie m_{N_2} , m_{O_2} i m_{H_2O} są to odpowiednio ilości moli azotu, tlenu i wilgoci, doprowadzone z powietrzem na 1 kg paliwa, zaczerpnięte z bilansu materiałowego paleniska,

$c_p N_2$, $c_p O_2$ i $c_p H_2O$ — ciepła właściwe przy stałej prężności odpowiednich składników powietrza, zaczerpnięte z tabl. III-2

$$Q_2 = (389,2 \cdot 6,96 + 103,5 \cdot 6,99 + 7,3 \cdot 7,98) \cdot 16 = 55843 \text{ cal} \cong 56 \text{ kcal}$$

ROZCHÓD

1. Ciepło zawarte w gazach spalinowych Q_3 oblicza się ze wzoru [III-42]

$$Q_3 = m_{sp} \cdot c_{psp} \cdot t_{sp} \quad \text{[III-58]}$$

a średnie ciepło właściwe gazów spalinowych — ze wzoru [III-44], do którego podstawiamy ciepła właściwe CO_2 , N_2 , O_2 i H_2O z tabl. III-2, natomiast ilości moli tych gazów — z bilansu materiałowego

$$c_{psp} = \frac{\sum m \cdot c_p}{\sum m} = \frac{57,2 \cdot 12,22 + 33,6 \cdot 9,52 + 38,8 \cdot 8,06 + 389,8 \cdot 7,64}{57,2 + 33,6 + 38,8 + 389,8} = 8,3 \text{ cal/mol} \cdot ^\circ C$$

Podstawiając odpowiednie wartości do wzoru [III-59], otrzymamy

$$Q_3 = 519,4 \cdot 8,3 \cdot 1250 = 5383200 \text{ cal} \cong 5383 \text{ kcal}$$

2. Straty w żuźlu, czyli straty wskutek niecałkowitego spalania, Q_4 obliczamy ze wzoru [III-41]

$$Q_4 = 8,1 A \frac{s}{100-s} G_{pal} = 8,1 \cdot 4,49 \frac{24}{100-24} \cdot 1 = 115 \text{ kcal}$$

3. Ciepło wypromienowane użytecznie Q_5 wynosi 9% ciepła wytworzonego w palenisku, czyli

$$Q_5 = 0,09 W = 0,09 \cdot 6519 = 587 \text{ kcal}$$

4. Ciepło stracone do otoczenia Q_6 obliczamy jako resztę

$$Q_6 = Q_1 + Q_2 - (Q_3 + Q_4 + Q_5) = 6519 + 56 - (5383 + 115 + 587) = 490 \text{ kcal}$$

Układając powyższy bilans cieplny w postaci tablicy otrzymamy

PRZYCHÓD	kcal	%		kcal	%
1. Ciepło doprowadzone z paliwem	6519	99,1	1. Ciepło odprowadzone ze spalinami	5383	81,9
2. Ciepło doprowadzone z powietrzem	56	0,9	2. Straty ciepła w żużlu	115	1,7
			3. Ciepło wypromieniowane użytecznie	587	9,0
			4. Ciepło stracone do otoczenia	490	7,4
Razem	6575	100,0		6575	100,0

Opierając się na bilansie cieplnym paleniska, możemy obliczyć sprawność tego paleniska, która wynosi

$$\eta = \frac{5383 + 587}{6575} = 0,908$$

WYKORZYSTANIE CIEPŁA GAZÓW ODLOTOWYCH

1. Wstęp

Gazy spalinowe, które opuszczają komorę lub strefę roboczą pieca, posiadają zwykle wysoką temperaturę wynoszącą w zależności od rodzaju pieca od kilkuset do tysiąca kilkuset stopni Celsjusza. Ciepło zawarte w tych gazach zużywa się w niektórych piecach do podgrzewania materiałów wchodzących do strefy roboczej, głównie w piecach pracujących na zasadzie przeciwprądu (jak w piecach tunelowych, szybowych, kręgowych i obrotowych). W innych przypadkach wykorzystuje się je do podgrzewania powietrza i paliwa gazowego, wytwarzania pary i ogrzewania wody, do podsuszania surowca i paliwa (węgla brunatnego, torfu i drewna), a poza tym do innych celów.

Podgrzewanie paliwa gazowego i powietrza potrzebnego do spalania kosztem ciepła zawartego w gazach spalinowych ma na celu nie tylko użyteczne wykorzystanie ciepła odpadkowego, zmniejszenie strat kominowych, podwyższenie sprawności pieca i obniżenie zużycia w nim paliwa, lecz również, co w wielu przypadkach jest ważniejsze, podwyższenie temperatury spalania w piecu.

Piece, w których proces technologiczny wymaga utrzymywania wysokich temperatur, można prowadzić w przypadku odpowiedniego podgrzewania powietrza nie tylko na paliwie wysokokalorycznym, lecz również na paliwie miejscowym o niskiej wartości opałowej (np. na węglu brunatnym lub torfie) bez obawy obniżenia wydajności pieców i pogorszenia technologicznych warunków ich pracy.

Do podgrzewania powietrza i paliwa gazowego gazami spalinowymi, wychodzącymi z komory roboczej pieca, są używane regeneratory i rekuperatory.

Regeneratory stosuje się w przypadkach, gdy proces technologiczny wymaga ogrzewania powietrza i gazów palnych do bardzo wysokich temperatur dochodzących do 1000—1200°C (np. w piecach martenowskich do wytapiania stali). Zasada ich pracy polega na pobieraniu ciepła od gorących gazów spalinowych, które po wyjściu z komory roboczej przepływają przez regeneratory, ogrzewając ich wypełnienie, i na oddawaniu

tego ciepła powietrzu lub paliwu gazowemu; gazy te po upływie pewnego czasu przepuszcza się przez regeneratory w kierunku odwrotnym.

Podgrzewanie powietrza lub palnych gazów w regeneratorach, jak wynika z poprzedniego, połączone jest z przełączaniem regeneratora co pewien okres czasu na bieg „gorący”, podczas którego odbywa się ogrzewanie jego wypełnienia i oziębianie gazów spalinowych, a następnie — na bieg „zimny”, w czasie którego przepływa przez regenerator ogrzewane powietrze lub paliwo gazowe.

Powoduje to, jak zostanie później wyjaśnione, okresowe zmiany kierunku ruchu płomienia i gazów spalinowych w komorze roboczej pieca, co bardzo komplikuje jego konstrukcję i obsługę oraz przyczynia się do wzrostu kosztów eksploatacji, natomiast wpływa dodatnio na równomierniejszy rozkład temperatur w komorze roboczej.

Rekuperatory są stosowane do podgrzewania powietrza lub rzadziej — paliwa gazowego do temperatur niższych od 1000°C . W przeciwieństwie do regeneratorów pracują one w sposób ciągły, przewodząc ciepło od środowiska ogrzewającego (gazy spalinowe) poprzez ściany kanałów lub rur do środowiska ogrzewanego. Rekuperatory bywają metalowe i ceramiczne.

Intensywność wymiany ciepła w rekuperatorach metalowych jest znacznie większa niż w rekuperatorach ceramicznych, ponieważ przewodnictwo właściwe metali, jak wiadomo, jest znacznie większe od przewodnictwa właściwego materiałów ceramicznych. Rekuperatory ceramiczne natomiast są bardziej odporne na działanie wysokich temperatur, wskutek czego stosuje się je w tych przypadkach, gdy konieczne jest podgrzewanie powietrza do temperatur wyższych od $500\text{--}700^{\circ}\text{C}$.

Odporność rekuperatorów metalowych na działanie wysokich temperatur zależy od materiałów, z których są one wykonane. Do ich budowy stosuje się zwykle żeliwo szare i żeliwo specjalne odporne na wysokie temperatury oraz stal węglową lub specjalne ognioodporne stopy stalowe.

Zwykła stal węglowa wytrzymuje temperaturę ok. $450\text{--}500^{\circ}\text{C}$, a zwykle żeliwo szare — ok. $500\text{--}550^{\circ}\text{C}$. Wobec tego powietrze lub paliwo gazowe można ogrzewać w rekuperatorach stalowych do temp. $250\text{--}300^{\circ}\text{C}$, a w żeliwnych — do temp. $300\text{--}350^{\circ}\text{C}$ pod warunkiem, że temperatura gazów spalinowych dopływających do rekuperatora nie przekracza $700\text{--}750^{\circ}\text{C}$ i prędkość powietrza w rekuperatorze jest kilkakrotnie większa od prędkości spalin.

W przypadku gdy trzeba podgrzewać powietrze do temperatur wyższych $350\text{--}400^{\circ}\text{C}$, rekuperatory należy wykonywać z żeliwa specjalnego lub ze stali stopowych odpornych na wysokie temperatury. Najodpowiedniejsze są żeliwa z domieszką chromu, a stale z domieszką chromu i niklu. Chrom zwiększa odporność stopów na utlenianie, a nikiel polepsza ich własności mechaniczne.

Ze względu na konieczność oszczędzania niklu jako metalu deficytowego ostatnio zaczęto coraz częściej stosować stale chromowe. Stal zawierająca od 12 do 14% Cr wytrzymuje temperaturę do 800°C, a przy większej zawartości Cr (do 30%) odporność jej wzrasta aż do 1100°C, natomiast znacznie zmniejsza się jej wytrzymałość mechaniczna.

Odporność stali na utlenianie w wysokich temperaturach można osiągnąć przez aliterowanie, tj. nasycanie glinem (Al) jej warstwy powierzchniowej metodą cieplną. Aliterowanie skutecznie zwiększa odporność stali na utlenianie w przypadku, gdy temperatura jej nie przekracza 700—800°C.

Na odporność stali i żeliwa na działanie wysokich temperatur duży wpływ wywiera również skład chemiczny gazów spalinowych. Jeżeli zawierają one związki siarki (np. znaczną ilość SO₂), to nie należy stosować stali chromowo-niklowych, ponieważ powstają łatwo topliwe związki niklu z siarką.

W celu zabezpieczenia rur rekuperatorów metalowych od szkodliwego działania wysokich temperatur należy dążyć do obniżenia temperatury ich ścianek, nie obniżając temperatury ogrzewanego powietrza ani ogrze-

Tablica IV-1
MATERIAŁY DO WYKONYWANIA REKUPERATORÓW
METALOWYCH

Metal	Najwyższa dopuszczalna temperatura metalu w °C
Stal miękka	400
Stal węglowa aliterowana	500—600
Zwykłe żeliwo szare	450
Żeliwo z dodatkiem Cr = 1—1,5%	600
Żeliwo krzemowe (Si = 5,5—6,5%, Cr = 0,5—1%)	700
Żaroodporne żeliwo z dodatkiem Cr = 10—30%	700—900
Żaroodporna stal zawierająca Cr, Ni, Si, Ti i inne (stale chromowe, chromoniklowe, krzemowo-chromowe i inne)	700—1100

wających gazów spalinowych. Można to osiągnąć przez obniżenie cząstkowego współczynnika przenikania ciepła α_1 , od strony gazów spalinowych, zmniejszając ich prędkość, i powiększenie cząstkowego współczynnika przenikania ciepła α_2 od strony powietrza, przepuszczając go przez rekuperator z dużą prędkością. Z tego powodu prędkość gazów spalinowych w rekuperatorach metalowych jest zwykle mała i równa się od 0,5 do

1,5 m/sek, a prędkość powietrza jest duża i wynosi od kilku do kilkunastu metrów na sekundę.

Odporność na wysokie temperatury materiałów metalowych najczęściej stosowanych do budowy rekuperatorów jest podana w tabl. IV-1.

2. Rekuperatory metalowe z rur gładkich

Pierwsze rekuperatory metalowe pieców przemysłowych stosowane były jeszcze przed pierwszą wojną światową. Budowano je z żeliwnych rur gładkich o średnicy od 100 do 150 mm. Stosował je również w projektowanych przez siebie piecach prof. W. E. Grum-Grzymajło.

Zaletą tych rekuperatorów była łatwość wykonania i mały koszt. Posiadały one jednak kilka istotnych wad, między innymi niedostateczną szczelność uniemożliwiającą stosowanie nadciśnienia ogrzewanego w nich powietrza, ponieważ przez nieszczelności przedostawały się duże jego ilości do gazów spalinowych posiadających niższe ciśnienie, co znacznie pogarszało ciąg. Wskutek tego rekuperatory z gładkich rur żeliwnych mogły pracować przy ciągu naturalnym tylko w przypadku małych prędkości powietrza, wynoszących od 1 do 2 Nm/sek (tj. przy sprowadzeniu objętości do normalnych warunków). Mała prędkość powietrza i duża średnica rur rekuperatora ujemnie wpływają na wielkość współczynnika przenikania ciepła k , który w rekuperatorach tego rodzaju wynosi ok. 3 kcal/m² · godz · °C, rzadko przekraczając powyższą wielkość. Wskutek niedostatecznego chłodzenia przez ogrzewane powietrze ścianki rur tych rekuperatorów ulegały silnemu przegrzewaniu, co powodowało ich szybkie przepalanie i stosunkowo częste pęknięcie.

Omówione wady oraz duża przestrzeń zajmowana przez żeliwne rekuperatory z rur gładkich są przyczyną, dla której obecnie nie są one stosowane.

W piecach nowszych konstrukcji stosuje się rekuperatory z rur stalowych gładkich, rzadziej z żebrowanych oraz żeliwne rekuperatory iglaste i rekuperatory płaskie.

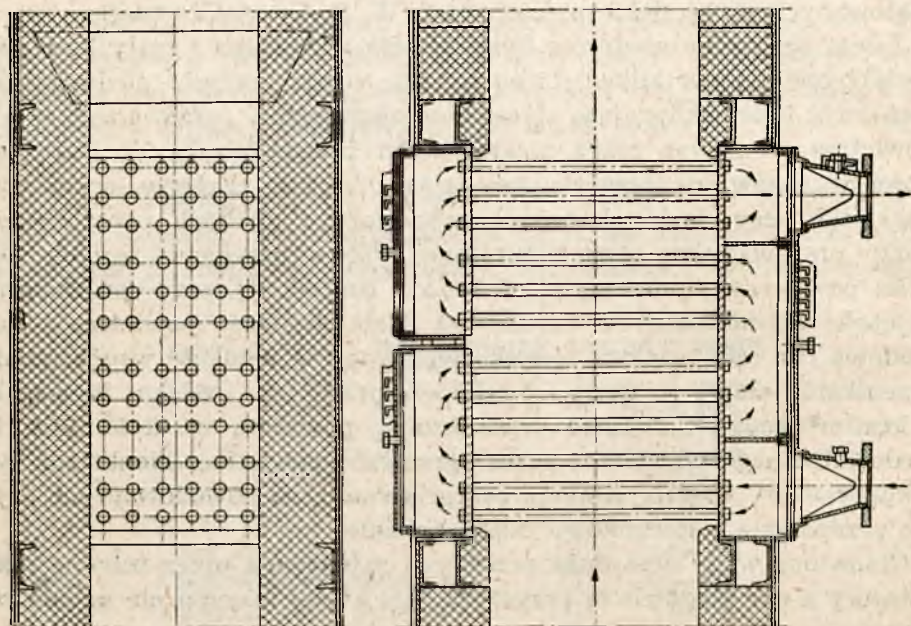
Rekuperatory z gładkich rur stalowych są wykonywane z rur ciągniętych bez szwu, o średnicy wewnętrznej od 15 do 100 mm i grubości ścianek od 3 do 5 mm; rury zamocowuje się w dnach sitowych komór zbiorczych przez spawanie lub rozwałcowywanie.

Powietrze płynie zwykle wewnątrz rur rekuperatora, a gazy spalinowe na zewnątrz nich — prostopadle do rur. Spotyka się również konstrukcje rekuperatorów z rur gładkich, w których powietrze płynie na zewnątrz, a gazy spalinowe wewnątrz rur.

Na rys. IV-1 przedstawiono czterobiegowy rekuperator z gładkich, poziomych rur stalowych do ogrzewania powietrza lub paliwa gazowego. Ruch powietrza w nim ma kierunek naturalny, gazów spalinowych zaś — nienaturalny. Są one skierowane z dołu do góry ze względu na zabez-

pieczenie równomierniejszego rozkładu temperatur w ściankach rurek. Gdyby kierunek ruchu gazów spalinowych był odwrotny, to różnica temperatur pomiędzy gorącymi gazami spalinowymi i powietrzem ogrzanym do wysokiej temperatury, płynącym w przeciwnym kierunku do gazów, byłaby w górnym szeregu rurek zbyt mała, wskutek czego ścianki tych rurek mogłyby się ogrzać do nadmiernie wysokiej temperatury, co spowodowałoby szybsze przepalenie rurek.

Ze względu na konieczność zabezpieczenia ścian rurek od ogrzewania się do zbyt wysokiej temperatury i przedłużenia w ten sposób okresu



Rys. IV-1. Czterobiegowy poziomy rekuperator z rur gładkich

ich pracy, nadaje się powietrzu płynącemu wewnątrz rur w rekuperatorze kilkakrotnie większą prędkość (zwykle od 2,5 do 4 razy) niż gazom spalinowym po zewnętrznej stronie rurek.

Omawiany rekuperator (rys. IV-1) jest przeznaczony do podgrzewania powietrza lub paliwa gazowego do temp. 250—280°C za pomocą gazów spalinowych o temperaturze nie wyższej niż 700—750°C i przy prędkości powietrza nie mniej niż trzykrotnie większej od prędkości spalin. Przekroczenie powyższych temperatur lub obniżenie stosunku prędkości powietrza do prędkości ogrzewających gazów może spowodować zbyt silne przegrzanie rur rekuperatora.

Rekuperator, jak widać na rys. (IV-1), jest ustawiony w pionowym kanale dymowym. Przednie jego komory powietrzne (od strony wlotu i wylotu powietrza) są przyspawane na stałe do ramy z belek ceowych,

tylne zaś leżą na niej swobodnie, co daje rurkom możliwość łatwego wydłużania i kurczenia się przy zmianach temperatury. W celu uzyskania przy tym szczelności pod komorami ruchomymi są umieszczone na belkach ceowych sznury azbestowe. Długość rurek w rekuperatorach tego rodzaju jest zwykle nie większa niż 0,8 do 0,9 m ze względu na konieczność ograniczenia do minimum przesunięć komór ruchomych przy zmianach temperatur.

Zaletą rekuperatora przedstawionego na rys. IV-1 jest prosta konstrukcja, łatwość wykonania i mały koszt, wadą zaś — mała powierzchnia ogrzewalna oraz stosunkowo niskie temperatury powietrza i spalin, przy których można go stosować bez obawy przepalenia.

Na rys. IV-2 przedstawiono rekuperator z gładkich, pionowych rur stalowych o średnicy 50 mm i długości 1,2 m. Konstrukcja tego rekuperatora została opracowana w jednym z radzieckich instytutów naukowo-badawczych.

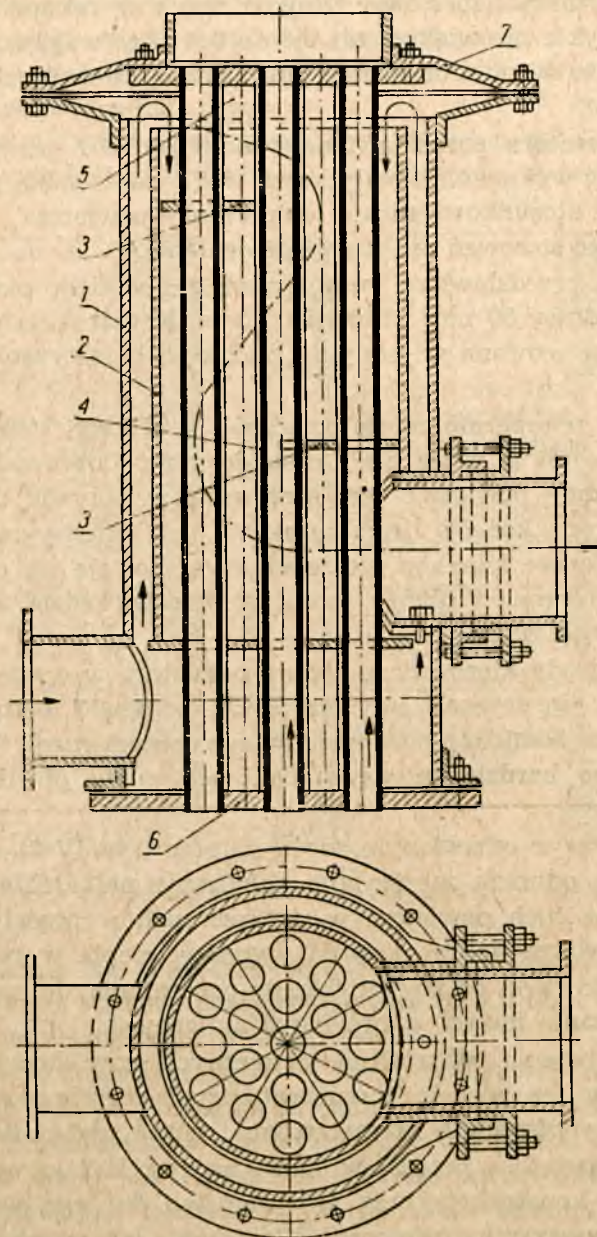
Rury w tym rekuperatorze są połączone z płytami przez spawanie. Gazy spalinowe płyną przez nie z dołu do góry. Doprowadzane zaś do rekuperatora zimne powietrze jest kierowane w poprzek dolnych najbardziej ogrzanych końców jego rurek w celu intensywniejszego ich chłodzenia. Następnie kanałem pierścieniowym dostaje się ono do góry, gdzie zmienia kierunek i płynąc w dół w przeciwnym kierunku ze spalinami, omywa górne części rurek.

Poziome przegrody kierownicze nadają powietrzu w czasie jego ruchu w dół kierunek w poprzek rur grzejnych, ponieważ wymiana ciepła w tym przypadku pomiędzy powierzchnią zewnętrzną rurek i powietrzem jest, jak wiadomo, bardziej intensywna niż przy ruchu powietrza wzdłuż rurek.

Droga powietrza w omawianym rekuperatorze (rys. IV-2), na początku której następuje od razu intensywne chłodzenie najbardziej ogrzanych części rurek oraz ruch powietrza w poprzek nich w przeciwnym kierunku do ruchu spalin, stwarza dobre warunki wymiany ciepła w rekuperatorze i zabezpiecza jego rurki od zbyt szybkiego przepalenia się, natomiast powoduje powstawanie dużych oporów hydraulicznych.

W celu umożliwienia odkształceń termicznych przy zmianach temperatur rekuperator ten posiada kompensator typu membranowego, umieszczony pomiędzy płaszczem zewnętrznym i górną płytą sitową.

Zaletami rekuperatora przedstawionego na rys. II-2 są zwarta i stosunkowo prosta konstrukcja oraz łatwy dostęp do jego wnętrza, niezbędny przy oczyszczaniu i remoncie. Wystarczy, jak widać na rysunku, odkręcić śruby łączące denka sitowe rekuperatora z jego płaszczem oraz wysunąć króciec, przez który odchodzi podgrzane powietrze, aby można było wyjąć z płaszcza wnętrze rekuperatora. Do jego wad należy zaliczyć poza dużymi oporami, które musi pokonywać przepływające przez reku-



Rys. IV-2. Rekuperator z rur gładkich: 1 — płaszcz zewnętrzny, 2 — kierowniczy płaszcz wewnętrzny, 3 — poziome przegrody kierownicze, 4 — rurki, 5, 6 — górne i dolne denka sitowe, 7 — kompensator

perator powietrze, również i małą powierzchnię ogrzewalną, wskutek czego nadaje się on do ogrzewania powietrza lub paliwa gazowego tylko w małych instalacjach piecowych.

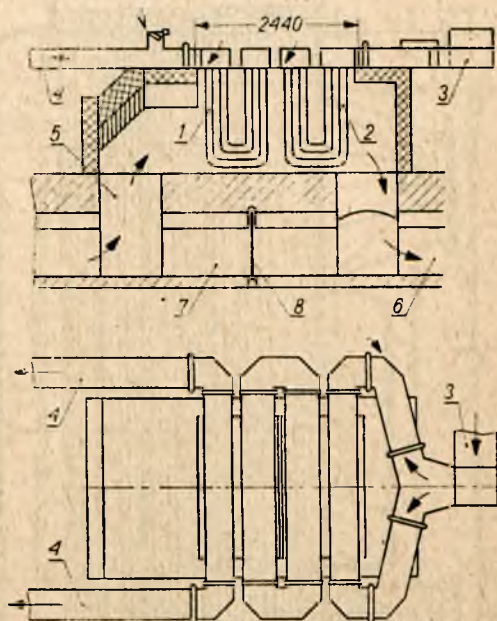
Przeprowadzone liczne badania eksperymentalne wykazały, że współczynnik przenikania ciepła k w omawianym rekuperatorze o rurkach ze stali węglowej, pokrytych w celu powiększenia ich odporności na wysokie temperatury cienką warstwą aluminium wynosi od 3 do 16 kcal/m²·godz·°C. Przy prędkości gazów spalinowych od 1,42 do 2,24 Nm/sek i prędkości powietrza od 0,6 do 2,1 Nm/sek spadek ciśnienia na pokonanie oporów wynosił w czasie badań po stronie gazów spalinowych od 1,5 do 2,5 mm H₂O, a po stronie powietrza — od 20 do 70 mm H₂O. Temperatura gorącego powietrza dochodziła przy tym do 545°C.

Na rys. IV-3 przedstawiono rekuperator typu pętlicowego ze stalowych rur gładkich o średnicy 50 mm. Końce jego rurek przypawane są do denek sitowych skrzyń powietrznych. Składa się on z dwóch sekcji, przez które kolejno przepływa powietrze w przeciwnym kierunku z gazami spalinowymi, płynącymi w poprzek rurek rekuperatora.

Jeden z takich rekuperatorów podgrzewał w pewnym piecu powietrze w ilości 500 Nm³/godz do temp. 400°C, gdy temperatura doprowadzanych gazów spalinowych wynosiła od 750 do 800°C. Współczynnik przenikania ciepła k osiągnął w nim wartość równą 20 kcal/m²·godz·°C. W ciągu 8 miesięcy pracy po 16 godz dziennie przepaliły się w tym rekuperatorze w pobliżu denka sitowego skrzyni powietrznej tylko 3 rurki grzejne z pierwszego szeregu od strony dopływu gazów spalinowych.

Zaletą rekuperatorów pętlicowych oprócz prostej konstrukcji jest brak specjalnych urządzeń do kompensacji odkształceń cieplnych, które są niezbędne w rekuperatorach z rurkami prostymi.

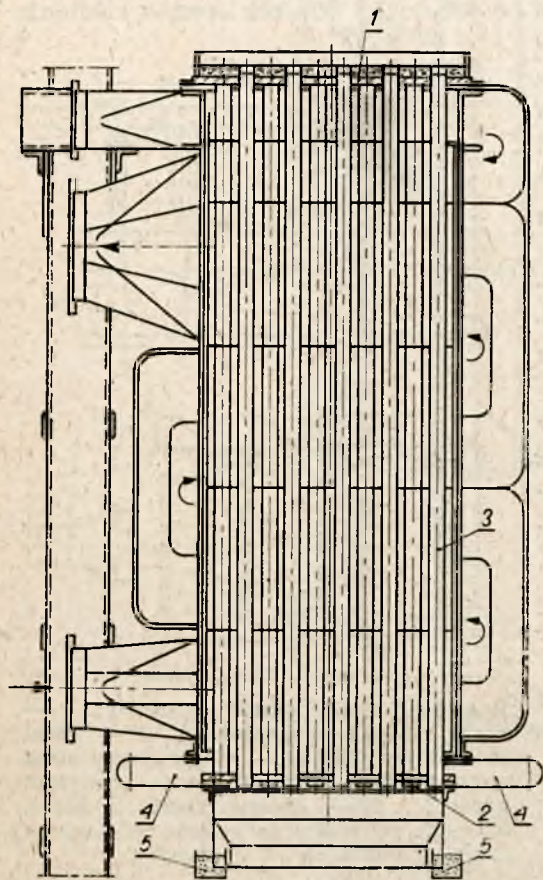
Na rys. IV-4 przedstawiono rekuperator ze stalowych rur gładkich o większej niż w omówionych rekuperatorach powierzchni ogrzewalnej,



Rys. IV-3. Rekuperator pętlicowy: 1 — rurki ze stali ognioodpornej, 2 — rurki ze stali zwykłej, 3 — dopływ powietrza zimnego, 4 — odprowadzania powietrza gorącego, 5 — dopływ spalin z pieca, 6 — odpływ spalin do komina, 7 — kanał omijający, 8 — zasuwa

przeznaczony do podgrzewania powietrza w piecach średniej wielkości i większych. Powietrze w tym rekuperatorze ma cztery biegi. Na skutek obecności poziomych przegród płynie ono w kierunku prostopadłym do rur grzejnych. Przegrody te przechodzą przez cały przekrój poprzeczny rekuperatora od przednich do tylnych skrzyżowań.

Gazy spalinowe płyną wewnątrz rurek z góry na dół, wskutek czego wymiana ciepła pomiędzy spalinami i powietrzem odbywa się przy prą-



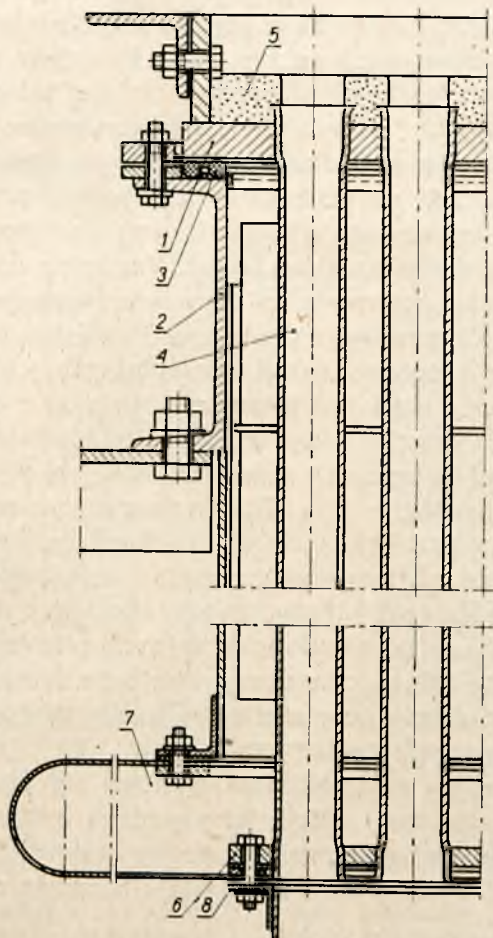
Rys. IV-4. Czterobiegowy pionowy rekuperator z rur gładkich: 1, 2 — górne i dolne denka sitowe, 3 — rurki, 4 — kompensator, 5 — uszczelnienie piaskiem

dach skrzyżowanych z zachowaniem ogólnej zasady przeciwprądu, ponieważ powietrze, jak widać na rys. IV-4, płynie z dołu do góry. Wpływa to dodatnio na współczynnik wymiany ciepła k .

W celu zabezpieczenia rurek grzejnych tego rekuperatora od szybkiego przepalania się w najbardziej gorącej jego strefie, tj. przy górnej płycie sitowej, doprowadza się dodatkowe zimne powietrze, które energicznie chłodzi rurki. W tym samym celu górna płyta sitowa jest izolowana od bezpośredniego działania gorących gazów spalinowych warstwą betonu odpornego na działanie wysokich temperatur.

Górna płyta sitowa omawianego rekuperatora spoczywa, jak przedstawiono na rys. IV-5, na ramie z belek ceowych. Między płytą i ramą znajdują się podkładki ze sznura azbestowego. Do ramy przyspawany jest płaszcz zewnętrzny rekuperatora. Jego rurki są połączone z płytami sitowymi przez rozwalcowanie.

Dolna płyta sitowa rekuperatora wisi swobodnie, co pozwala rurkom na odkształcenia cieplne przy zmianach temperatury. Szczelność kon-



Rys. IV-5. Szczegóły czterobiegowego pionowego rekuperatora z rur płaskich: 1 — górna płyta sitowa, 2 — rama, 3 — sznur azbestowy, 4 — rurki, 5 — beton ogniotrwały, 6 — dolna płyta sitowa, 7 — kompensator, 8 — uszczelka azbestowa

strukcji zapewnia kompensator typu membranowego z blachy stalowej o grubości 1,5 mm. Jest on połączony, jak widać na rys. IV-5, w górnej swej części z płaszczem zewnętrznym, w dolnej zaś — z wiszącą płytą sitową.

Przekrój poprzeczny tego rekuperatora ma kształt prostokątny. Jego rurki są rozmieszczone w szachownicę.

Długość rurek tego rekuperatora nie powinna być większa od 3,5 m, a najwyższa temperatura ich ścianek nie powinna przekraczać 450°C, ponieważ w przeciwnym razie następuje silne wydłużenie rurek w najbardziej gorących miejscach. Wydłużenie rurek zachodzi pod działaniem siły ciężkości dolnej płyty sitowej i samych rurek. Zmniejsza to grubość ich ścianek i powoduje szybsze przepalenie się.

Rekuperator z rur gładkich o dużej powierzchni ogrzewalnej, przeznaczony do podgrzewania powietrza w piecach metalurgicznych o większej wydajności, jest przedstawiony na rys. IV-6. Powyższy rekuperator składa się z dwóch głównych i jednej zabezpieczającej sekcji rur grzejnych.

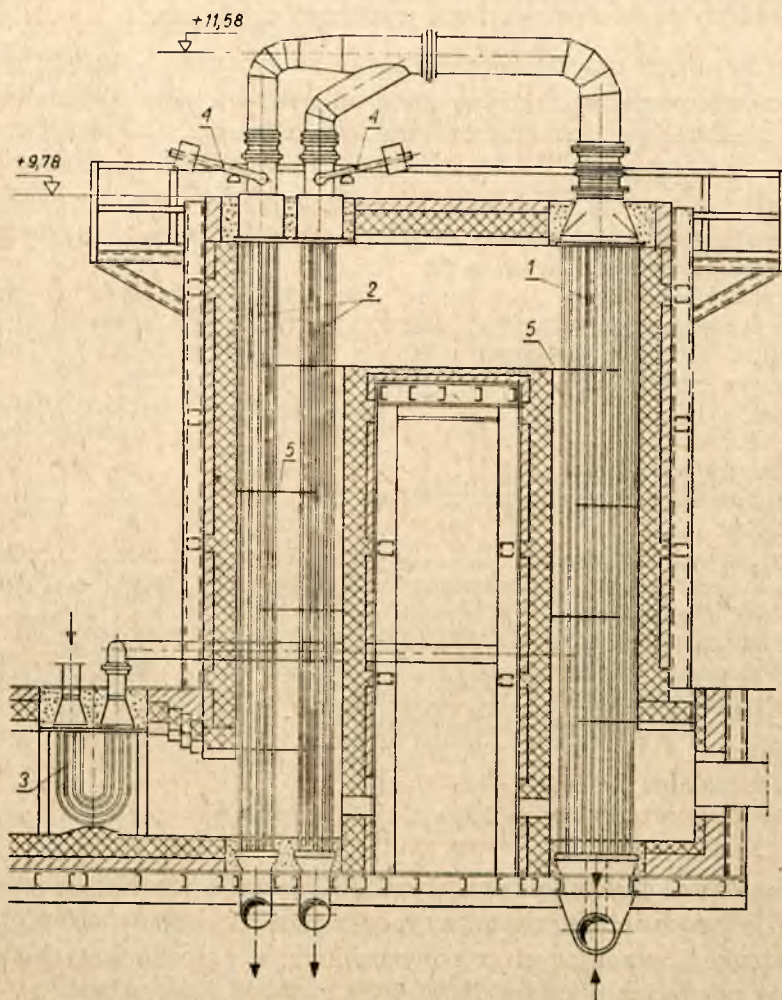
Sekcja zabezpieczająca jest właściwie rekuperatorem pętlicowym, którego zadaniem jest ochrona dolnej, najbardziej rozgrzanej części rurek grzejnych drugiej sekcji od promieniowania przestrzeni przedrekuperacyjnej. Przez rurki ochronnego rekuperatora pętlicowego przepływa zimne powietrze, które energicznie je chłodzi. Następnie dostaje się ono odpowiednim przewodem rurowym do rury doprowadzającej do instalacji główny strumień podgrzewanego powietrza. Powietrze wchodzi do dolnej skrzyni powietrznej pierwszej sekcji rur grzejnych i unosi się do góry, płynąc wewnątrz nich, skąd jest kierowane rurkami o dużej średnicy do skrzyń powietrznych drugiej sekcji. Pierwsza sekcja składa się, jak widać na rys. IV-6, z dwóch grup rurek grzejnych, którymi płynie powietrze na dół i ogrzane do odpowiednio wysokiej temperatury opuszcza rekuperator.

Gazy spalinowe po przejściu pomiędzy rurkami kaloryfera pętlicowego, gdzie obniża się nieco ich temperatura, dostają się do dolnej części szybu, w którym znajdują się rurki drugiej sekcji. Pomiędzy nimi płyną one do góry i przechodzą do szybu z rurkami grzejnymi pierwszej sekcji. W szybie tym opadają na dół i dostatecznie oziębione kierują się do kanału kominowego. W ten sposób gazy spalinowe w obu sekcjach płyną w przeciwnym kierunku z ogrzewanym powietrzem.

Jeżeli w omawianym rekuperatorze ogrzewa się powietrze do temp. 500—700°C, to rurki drugiej sekcji, jako bardziej rozżarzone, należy wykonywać ze specjalnych ogniotrwałych stopów stalowych, rurki zaś sekcji pierwszej mogą być wykonywane z materiału tańszego, np. ze stali węglowych.

W dużych rekuperatorach rurkowych bardzo istotne jest prawidłowe rozwiązanie zagadnienia odkształceń cieplnych. Przy długości rur grzejnych rekuperatora od 4 do 5 m i przy ogrzewaniu w nich powietrza do temperatury powyżej 600°C przyrost długości rurek dochodzi do 50 mm. Z tego powodu dla zabezpieczenia rur grzejnych od wybożenia na skutek wzrostu ich temperatury zastosowano w omawianym rekuperatorze (rys. IV-6) dźwigniowe przeciwwagi wywołujące w rurkach tylko niewielkie naprężenia rozciągające.

Duże znaczenie ma również zapewnienie równomiernego ogrzewania rurek w poprzecznym przekroju sekcji. Końce rurek są przecięż sztywno zamocowane (przyspawane lub rozwalcowane) w płytach sitowych stanowiących denka skrzyń powietrznych i gdyby ogrzewały się nierówno-



Rys. IV-6. Rekuperator z rur gładkich o dużej powierzchni ogrzewalnej: 1, 2 — pierwsza i druga sekcja rur grzejnych, 3 — sekcja zabezpieczająca, 4 — przeciwwagi, 5 — przegrody kierownicze

miennie, mogłyby być przyczyną uszkodzeń denek sitowych i rurek rekuperatora wskutek niejednakowych wydłużeń cieplnych. W celu przeciwdziałania temu bardziej ogrzane sekcje rur grzejnych dzieli się na kilka (dwie, trzy lub więcej) grup i dla każdej grupy stosuje się oddzielne przeciwwagi dźwigniowe.

Przeciwwagi kompensacyjne i podział rurek na dwie grupy zostały w rekuperatorze przedstawionym na rys. IV-6 zastosowane tylko do rurek drugiej sekcji, ponieważ ściany tych rurek ogrzewają się do wysokich temperatur. Temperatura rurek pierwszej sekcji jest znacznie niższa i z tego powodu nie zachodzi konieczność stosowania tak skomplikowanych urządzeń do kompensacji ich wydłużeń cieplnych.

Tablica IV-2

CHARAKTERYSTYKA DUŻYCH REKUPERATORÓW Z RUR GŁADKICH
(rys. IV-6)

Parametry	I	II	III
Ilość powietrza w Nm ³ /godz	7000	8000	16000
Temperatura gazów spalinowych w °C			
a. przed rekuperatorem	900	900	1000
b. za rekuperatorem	300	300	340
Temperatura ogrzanego powietrza w °C	550	540	680
Powierzchnia ogrzewalna w m ²	170	228	480
Liczba rur	458	616	2×572
Wymiary rur w mm			
a. średnica wewnętrzna	24	24	33
b. grubość ścian	1,5	1,5	2,5
c. długość	4700	4700	3500
Moc cieplna w kcal/godz·10 ³	1210	1360	2500
Ciężar rekuperatora (bez obmurowania i izolacji cieplnej) w kg	16800	19000	40000
Strata ciśnienia w mm H ₂ O			
a. w kanałach powietrznych	235	235	160
b. kanałach dymowych	12	12	20
Współczynnik wymiany ciepła w kcal/m ² ·godz·°C	22,3	18,6	16,1
Ciężar rekuperatora, odniesiony do 1 m ² powierzchni ogrzewalnej w kg/m ²	98,9	83,5	83,5

Rekuperatory opisanego typu (rys. IV-6) buduje się różnej wielkości. W tabl. IV-2 podana jest charakterystyka trzech rekuperatorów omówionej konstrukcji, pracujących z powodzeniem, a przeznaczonych do podgrzewania powietrza w ilości 7000, 8000 i 16 000 Nm³/godz.

3. Rekuperatory metalowe z rur iglastych

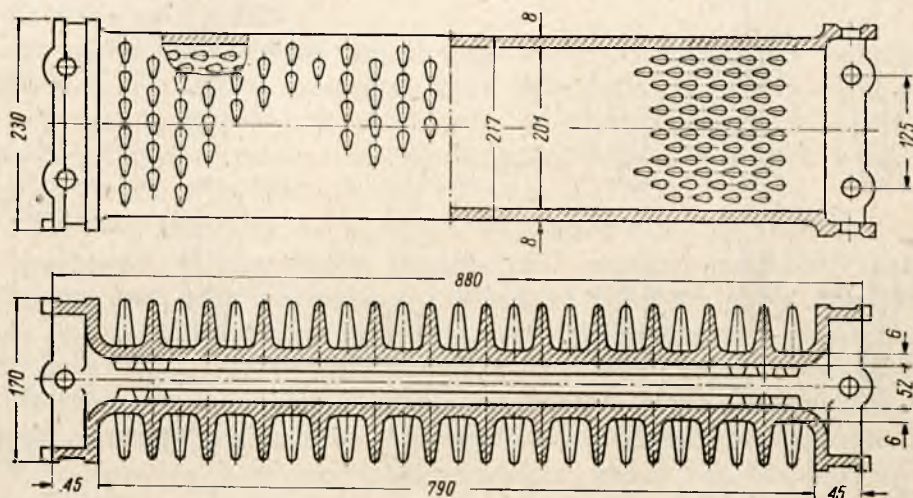
Po drugiej wojnie światowej zaczęto szeroko stosować rekuperatory z żeliwnych rur iglastych. W porównaniu z rekuperatorami z żeliwnych rur gładkich mają one znacznie większy współczynnik wymiany ciepła, a wskutek tego mniejszy ciężar w przeliczeniu na 1000 kalorii wymienionego ciepła oraz mniejszą objętość. Poza tym łatwiej jest wykonywać je dzięki temu, że zarówno rury, jak i inne elementy rekuperatorów są

znormalizowane i masowo wykonywane przez wyspecjalizowane zakłady przemysłowe.

Duży współczynnik wymiany ciepła rur iglastych spowodowany jest nie tylko tym, że igły powiększają rzeczywistą powierzchnię wymiany ciepła, lecz również i tym, że wywołują one powstawanie wirów w strumieniu przepływających gazów.

Należy jednak zaznaczyć, że oprócz wymienionych zalet rekuperatory z rur iglastych mają również wady, z których najważniejsze są trudność oczyszczania ich powierzchni z zanieczyszczeń oraz mała szczelność w miejscach łączenia.

Głównym elementem rekuperatora iglastego jest żeliwna rura (rys. IV-7) o spłaszczonym przekroju, posiadająca na zewnątrz i wewnątrz lub tylko



Rys. IV-7. Żeliwna rura iglasta

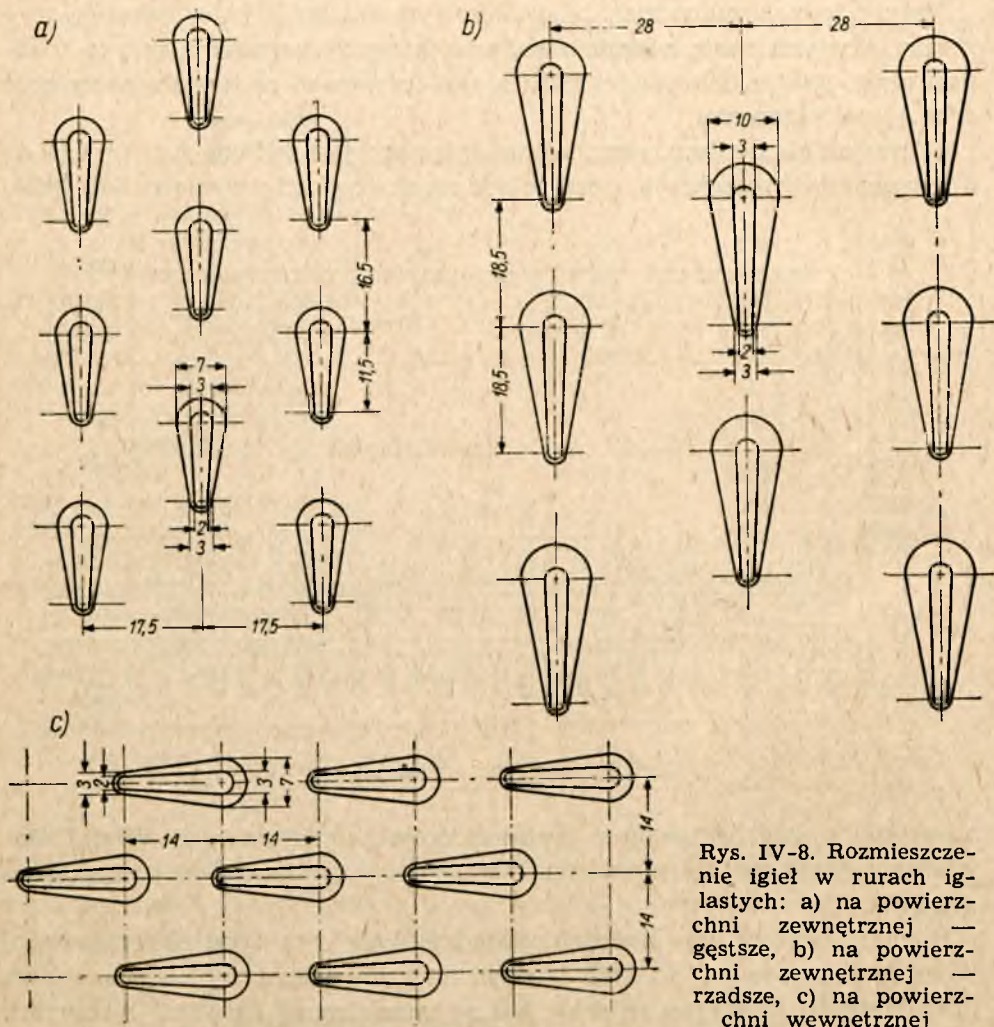
wewnątrz szereg nadlewów o kształcie opływowym, zwanych igłami. Powietrze płynie zwykle wewnątrz rury, a gazy spalinowe omywają ją na zewnątrz.

Rury iglaste na obu końcach posiadają kołnierze typu skrzyniowego, w których są otwory do śrub i rowki do umieszczenia w nich szczeliwa przy łączeniu kołnierzy ze sobą lub ze specjalnymi listwami łączącymi. Powierzchnie boczne tych kołnierzy są zwykle obrobione.

Omawiane rury posiadają długość od 880 do 2150 mm. Odpowiednio obliczeniowa ich powierzchnia ogrzewalna (tj. powierzchnia ogrzewalna bez uwzględnienia powierzchni igieł) wynosi od 0,25 do 0,66 m².

Rury iglaste bywają dwóch rodzajów — jednostronne i dwustronne. Jednostronne rury mają igły tylko wewnątrz, tj. od strony powietrza; zewnętrzna ich powierzchnia jest gładka. Dwustronne zaś mają igły również na powierzchni zewnętrznej (rys. IV-7).

Wskutek braku igieł na powierzchni zewnętrznej wymiana ciepła pomiędzy gazami spalinowymi a jednostronną rurą iglastą jest mniej intensywne niż pomiędzy rurą i powietrzem wewnątrz niej. Wpływa to dodatnio na obniżenie temperatury ścian rury, co pozwala na powiększenie temperatury przepływających przez kaloryfer gazów spalinowych.



Rys. IV-8. Rozmieszczenie igieł w rurach iglastych: a) na powierzchni zewnętrznej — gęstsze, b) na powierzchni zewnętrznej — rzadsze, c) na powierzchni wewnętrznej

Dwustronne rury iglaste są bardziej efektywne niż jednostronne, natomiast mniej odporne na wysokie temperatury i szybciej zanieczyszczają się od strony gazów spalinowych. Z tego powodu stosuje się je w rekuperatorach przy piecach ogrzewanych paliwem gazowym lub ciekłym, których gazy spalinowe nie zawierają pyłu i sadzy. Jednostronne rury iglaste można stosować w rekuperatorach obsługujących piece pracujące na dowolnym paliwie stałym.

Ze względu na intensywne ogrzewanie dwustronnych rur iglastych przez gazy spalinowe temperatura ścianek tych rur podczas pracy kaloryfera jest dość wysoka. Ażeby nie przekroczyła ona temperatury dopuszczalnej, temperatura gazów spalinowych doprowadzanych do rekuperatora nie powinna przekraczać określonej wysokości.

Rozmieszczenie igieł na zewnętrznej powierzchni rur iglastych bywa dwojakie: gęstsze (rys. IV-8 a) albo rzadsze (rys. IV-8 b). W pierwszym przypadku odległość pomiędzy rzędami igieł wynosi 17,5 mm, w drugim zaś — 28 mm. Wysokość igieł w obu przypadkach jest jednakowa i wynosi 40 mm, inne zaś wymiary, jak widać na rys. IV-8, są różne.

Rozmieszczenie igieł na wewnętrznej powierzchni tych rur jest jednakowe niezależnie od rozmieszczenia igieł na powierzchni zewnętrznej. Wysokość igieł wewnętrznych wynosi tylko 20 mm, inne zaś ich wymiary są podane na rys. IV-8 c.

Kołnierze rur iglastych obu powyższych typów są zupełnie jednakowe. Kołnierze rur nie posiadających igieł na powierzchni zewnętrznej mają identyczną konstrukcję i takie same wymiary jak rury z igłami zewnętrznymi z wyjątkiem szerokości, która wynosi w nich 115 mm zamiast 170 mm (rys. IV-7).

Szerokość kołnierzy rur iglastych bez zewnętrznych igieł została celowo zmniejszona, w przeciwnym bowiem razie przekrój poprzeczny kanału, którym płyną gazy spalinowe, w braku igieł byłby zbyt duży. Wielkość tę tak dobrano, aby można było dwie rury iglaste z igłami zewnętrznymi zastąpić trzema rurami bez zewnętrznych igieł, wskutek czego odległość pomiędzy osiami jednostronnych rur iglastych jest w kaloryferach iglastych znacznie mniejsza niż w kaloryferach dwustronnych. Umożliwia to umieszczenie w 1 m³ objętości kaloryfera więcej rur bez igieł na ich powierzchni zewnętrznej.

Charakterystyka rur iglastych omówionych typów jest podana w tabl. IV-3.

Optymalna prędkość powietrza wewnątrz rur iglastych, odniesiona do normalnych warunków, równa się zwykle od 4 do 10 Nm/sek, a dla gazów spalinowych na zewnątrz nich — od 3 do 6 Nm/sek. Współczynnik przewodnictwa cieplnego zależy od prędkości przepływu spalin i powietrza. W przeliczeniu na 1 m² powierzchni obliczeniowej wynosi on od 16 do 40 kcal/m² · godz · °C, przy czym jest on nieco większy dla rur dwustronnych.

Chociaż jednostronne rury iglaste mają mniejszy współczynnik przenikania ciepła, mieści się ich jednak w 1 m³ więcej niż rur dwustronnych, wskutek czego gabaryty rekuperatorów iglastych z rur jednostronnych wcale nie są większe (a raczej mniejsze przy jednakowych pozostałych warunkach) od rekuperatorów z rur dwustronnych. Całkowite zaś koszty wykonania mało się różnią od siebie.

Tablica IV-3

CHARAKTERYSTYKA RUR IGLASTYCH

Parametry charakterystyczne	17,5				28				Rury bez zewnętrznych igieł							
	880	1135	1385	1640	880	1135	1385	1640	880	1135	1385	1640	880	1135	1385	1640
Długość rury w mm	880	1135	1385	1640	880	1135	1385	1640	880	1135	1385	1640	880	1135	1385	1640
Przekrój powietrzny w m ²	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Przekrój do spalin w m ²	0,060	0,080	0,100	0,120	0,070	0,092	0,114	0,136	0,042	0,055	0,067	0,080	0,042	0,055	0,067	0,080
Liczba igieł od strony powietrza	636	852	1068	1284	636	852	1068	1284	636	852	1068	1284	636	852	1068	1284
Liczba igieł od strony spalin	558	740	922	1118	298	396	496	594	--	--	--	--	--	--	--	--
Powierzchnia ogrzewalna od strony powietrza w m ²	0,83	1,12	1,41	1,70	0,83	1,12	1,41	1,70	0,83	1,12	1,41	1,70	0,83	1,12	1,41	1,70
Powierzchnia ogrzewalna od strony spalin w m ²	1,34	1,81	2,27	2,64	0,95	1,26	1,60	1,90	0,40	0,53	0,66	0,79	0,40	0,53	0,66	0,79
Umowna (obliczeniowa) powierzchnia ogrzewalna w m ²	0,25	0,33	0,425	0,50	0,25	0,33	0,425	0,50	0,25	0,33	0,425	0,50	0,25	0,33	0,425	0,50
Ciężar rury w kg	45	55	66	80	41	52	63	76	31	39	47	55	31	39	47	55
Długość rury pomiędzy kołnierzami (długość kanału spalinowego) w mm	790	1045	1295	1550	790	1045	1295	1550	790	1045	1295	1550	790	1045	1295	1550

Montaż rekuperatora z rur iglastych polega na połączeniu ze sobą śrubami kołnierzy poszczególnych rur. Na obwodzie sekcji kołnierze rur są przyśrubowane do ramy utworzonej z listew specjalnej konstrukcji. Na rys. IV-9 przedstawiono szczegół połączenia listwy 2 z rurą iglastą 1 i skrzynią powietrzną 3.

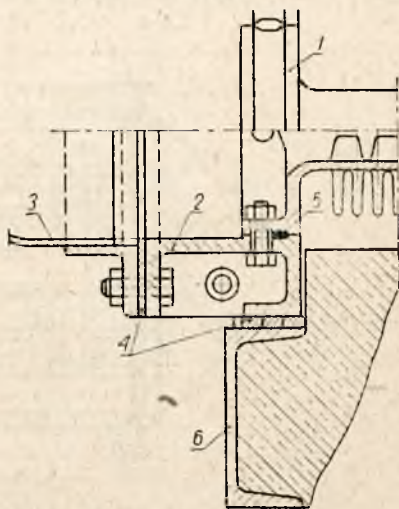
Listwy są to żeliwne beleczki o przekroju pokazanym na rys. IV-9. Mają one otwory do śrub, za pomocą których przyśrubowuje się do nich rury iglaste i skrzynie powietrzne. Długość ich równa się jednej, dwóm lub trzem długościom odpowiednich boków kołnierzy rur iglastych.

Zmontowana sekcja rekuperatora, przez którą przepływa powietrze nie zmieniając swego kierunku, nazywa się „biegiem”. Najczęściej są stosowane rekuperatory dwubiegowe (rys. IV-10), w których można ogrzewać powietrze do temperatury 400°C przy temperaturze dopływających do rekuperatorów gazów spalinowych, równej $750\text{--}800^{\circ}\text{C}$.

Przy ogrzewaniu powietrza do temp. $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$ są stosowane rekuperatory jednobiegowe (rys. IV-11). Rekuperatory trój- i czterobiegowe są stosowane rzadziej, zwykle w tych przypadkach, gdy powietrze należy ogrzewać do temperatury wyższej od 400°C .

Opór, jaki stawiają rekuperatory iglaste przepływającemu powietrzu, wzrasta proporcjonalnie do liczby biegów, wskutek czego stosowanie rekuperatorów wielobiegowych wywołuje znaczne zwiększenie ciśnienia doprowadzanego powietrza i straty wskutek nieszczelności.

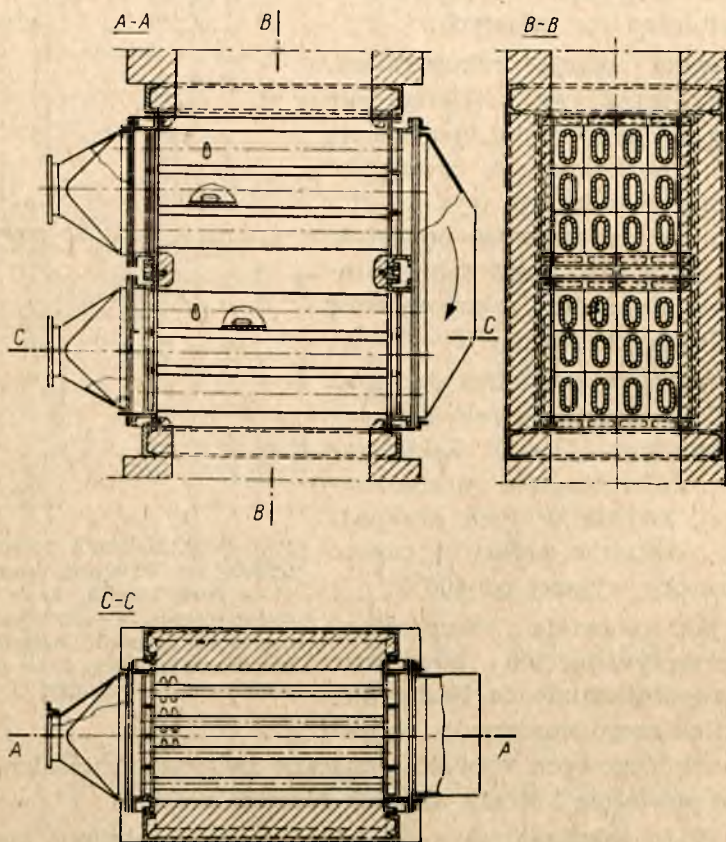
Na rys. IV-10 pokazana jest najbardziej rozpowszechniona konstrukcja dwubiegowa rekuperatora iglastego z rurami poziomymi. Każdy bieg (sekcja) tego rekuperatora posiada 12 rur iglastych. Gazy spalinowe płyną w tym rekuperatorze w kierunku pionowym. Taką konstrukcją (rys. IV-10), w której kierunek ruchu spalin jest pionowy, należy uznać za bardziej racjonalną niż z rurami pionowymi (IV-12), gdzie kierunek ruchu spalin jest poziomy. Rekuperatory bowiem z poziomym ruchem gazów spalinowych szybciej zanieczyszczają się sadzą i trudniej jest je oczyszczać. Z tego powodu ustawia się je tylko wyjątkowo, np. w kanale podziemnym, którym są odprowadzane gazy spalinowe z pieca do komina (rys. IV-12).



Rys. IV-9. Szczegół połączenia rury iglastej z króćcem powietrznym: 1 — rura iglasta, 2 — listwa łącząca (rama), 3 — króciec powietrzny, 4 — uszczelki azbestowe, 5 — kit uszczelniający, 6 — rama z cewownika

Chociaż żeliwne rekuperatory iglaste w porównaniu z rekuperatorami innych typów mają szereg zalet, o których już wspomniano poprzednio, a mianowicie zwartą budowę, efektywną wydajność cieplną, i zadowalającą odporność na wysokie temperatury, to jednak mają one dość istotną wadę — dużą liczbę trudnych do uszczelnienia miejsc styku pomiędzy kołnierzami rur.

Duża liczba styków przy nie zawsze dokładnym i starannym montażu powoduje obniżenie wydajności cieplnej rekuperatora iglastego wskutek



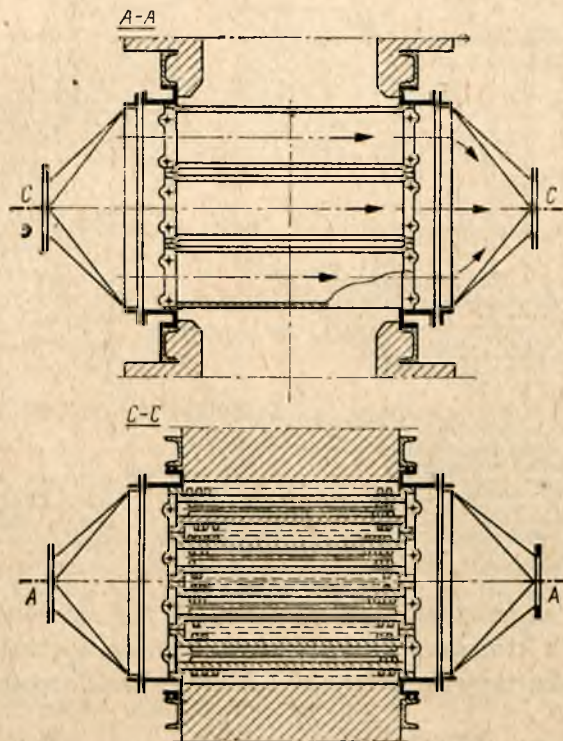
Rys. IV-10. Dwubiegowy rekuperator z rur iglastych

przepływu części powietrza do gazów spalinowych przez nieszczelności w połączeniach. Szczelność rekuperatorów iglastych zależy nie tylko od dokładności montażu, lecz również od rodzaju użytych materiałów uszczelniających.

Jako szczeliwo do uszczelniania miejsc, w których stykają się kołnierze ze sobą i z listwami łączącymi, stosuje się zwykle sznur azbestowy nasycony mlekiem szmatowym (mączka szmatowa zmieszana z roztworem boraksu) lub rzadziej — tekturę azbestową.

Jak wykazały liczne badania, strata powietrza wskutek szczelności przy stosowaniu na połączeniach uszczelki azbestowych w małych rekuperatorach iglastych, posiadających od 4 do 15 rur wynosi od 3 do 5%, w dużych zaś zawierających od 80 do 100 rur w jednym bloku dochodzi do 20—30% przy różnicy ciśnień pomiędzy powietrzem i gazami spalinowymi, równej ok. 700—800 mm H₂O i temperaturze kołnierzy ok. 500—600°C.

Wskutek braku możliwości osiągnięcia w rekuperatorach iglastych dobrej szczelności nie należy w nich ogrzewać gazów palnych. Jeżeli jakies

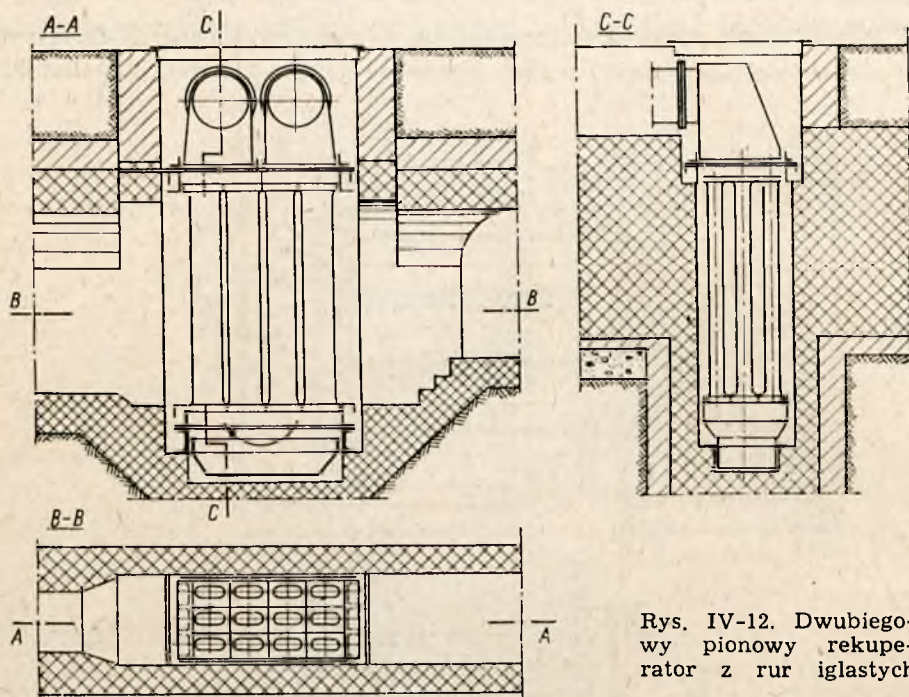


Rys. IV-11. Jednobiegowy rekuperator z rur iglastych

ważne przyczyny zmuszają jednak do ogrzewania paliwa gazowego w małych (posiadających najwyżej kilkanaście rur) rekuperatorach iglastych, to trzeba zwrócić szczególną uwagę na wykonanie starannego i dokładnego montażu. Co pewien okres czasu należy również przeprowadzać badania szczelności rekuperatorów, w których ogrzewa się paliwo gazowe.

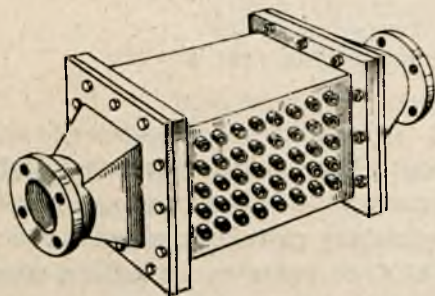
Do ogrzewania gazów palnych nadają się odznaczające się dużą szczelnością rekuperatory blokowe, nazywane również termoblokami. Z kilku produkowanych obecnie konstrukcji tego rodzaju rekuperatorów rozpatrzmy termobloki przedstawione na rys. IV-13 i IV-14.

Rekuperator blokowy przedstawiony na rys. IV-13 jest wykonywany z rurek stalowych odpowiedniej długości, o średnicy 12 lub 20 mm dla powietrza i 25 lub 30 mm dla gazów spalinowych, oraz z blachy stalowej o grubości 4—6 mm, z której po wywierceniu otworów na rurki spawa się szkielet w kształcie prostokątnej skrzyni. Następnie po wstawieniu rurek w te otwory przestrzeń pomiędzy rurkami, ograniczoną ścianami



Rys. IV-12. Dwubiegowy pionowy rekuperator z rur iglastych

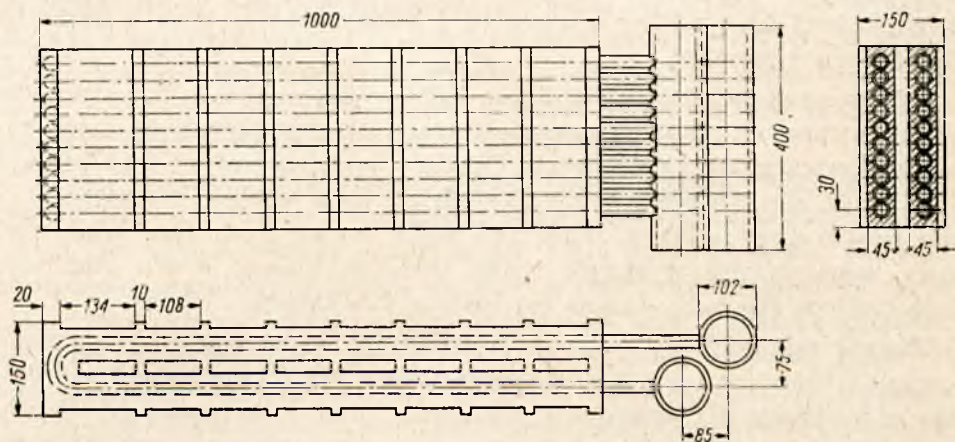
skrzyni, zalewa się roztopionym żelazem. W ten sposób otrzymuje się jednolity blok, do którego ścian czołowych o nieco większych wymiarach niż wymiary bloku przyśrubowuje się skrzynie powietrzne.



Rys. IV-13. Rekuperator blokowy

Rekuperator blokowy przedstawiony na rys. IV-14 jest prostszy w wykonaniu. Jest on odlany z żeliwa i nie posiada szkieletu z blach stalowych. W żeliwnym bloku znajduje się zalany pęk równoległych rurek

powietrznych o średnicy 19/25 mm w kształcie litery U. Końce tych rurek są przyspawane do dwóch kolektorów o średnicy 102 mm. Gazy spalinowe w tym rekuperatorze przepływają przez kanały o przekroju $30 \times 108 \text{ mm}^2$.



Rys. IV-14. Element składanego rekuperatora blokowego

Takie same kanały powstają pomiędzy blokami ustawionymi obok siebie dzięki nadlewom o wysokości 15 mm, które posiadają ich boczne powierzchnie.

Krótką charakterystyką termobloków przedstawionych na rys. IV-14 jest następująca:

Powierzchnia ogrzewalna od strony gazów spalinowych	1,5 m
Powierzchnia ogrzewalna od strony powietrza	1,2 m
Ilość powietrza przepływającego przez blok	100 Nm ³ /godz
Współczynnik wymiany ciepła przy prędkości gazów spalinowych 1—3 Nm/sek i prędkości powietrza 8—12 Nm/sek	20—25 kcal/m ² · godz · °C
Opór rekuperatora, stawiany przepływającemu powietrzu	60—80 mm H ₂ O
Końcowa temperatura ogrzewanego powietrza przy temperaturze dopływających gazów spalinowych 1100°C	400—450°C
Ciężar jednego bloku	200 kg

Konstrukcja termobloków, w których kanały dymowe posiadają kierunek prostopadły do rur powietrznych, zapewnia dużą ich szczelność, a wskutek tego, że tworzą one jednolity blok metalowy, ciepło w nich szybko przechodzi z miejsc bardziej ogrzanych do miejsc zimniejszych, przez co temperatura metalu od strony wejścia gorących spalin jest niewiele wyższa niż w innych miejscach bloku. Pozwala to na stosowanie termobloków przy wysokich (wyższych od 1000°C) temperaturach gazów spalinowych.

Poza zaletami termobloki mają również wady. Największymi z nich są mała powierzchnia ogrzewalna i duży ciężar zarówno bezwzględny, jak i w przeliczeniu na 1000 kcal przekazywanego powietrzu ciepła.

4. Rekuperatory ceramiczne

Rekuperatory ceramiczne stosuje się do podgrzewania powietrza do dość wysokich temperatur w granicach 600—1000°C. Wykonuje się je w większości przypadków z szamotu i karboszamotu, tj. z mieszaniny karborundu i szamotu.

Pierwsze rekuperatory ceramiczne były wykonywane ze zwykłych cegieł szamotowych przez murowanie szeregu przylegających do siebie kanałów powietrznych i dymowych. Oczywiście, rekuperatory tego rodzaju były tanie, ale efektywność cieplna ich nie była wielka, ponieważ były one bardzo nieszczelne w miejscach styku cegieł. Poza tym miały one mały współczynnik wymiany ciepła wskutek dużego oporu cieplnego dość grubych (65 mm) ścianek rozdzielających kanały.

Obecnie rekuperatory ceramiczne wykonuje się ze specjalnych szamotowych elementów fasonowych, posiadających kształt rur, cegieł lub bloków z otworami dla przepływu powietrza i gazów spalinowych. W celu powiększenia szczelności pomiędzy kanałami powietrznymi i spalinowymi powierzchniom styku tych elementów nadaje się skomplikowany kształt. Poza tym powyższe powierzchnie po wypaleniu elementów poddaje się szlifowaniu, a w czasie montażu łączy się je specjalną zaprawą.

W celu polepszenia wymiany ciepła i zmniejszenia oporu cieplnego ściany pomiędzy kanałami powietrznymi i spalinowymi wykonuje się możliwie cienkie a wymiary poszczególnych elementów (rur, cegieł fasonowych lub bloków) — możliwie duże. Ze względów wytrzymałościowych i technologicznych grubość ścianek pomiędzy kanałami nie powinna być jednak mniejsza od 13—15 mm, a wymiary gabarytowe rur, cegieł fasonowych i bloków nie powinny przekraczać 350—400 mm.

Usytuowanie spoin i bloków w miejscach styku poszczególnych elementów rekuperatorów ceramicznych ma istotne znaczenie dla uzyskania większej ich szczelności. Przy poziomym układaniu rur, cegieł fasonowych i bloków powstają mniej szczelne spoiny pionowe, które często się rozchodzą wskutek kolejnego ogrzewania i studzenia rekuperatorów przy ich uruchamianiu i zatrzymywaniu. Podczas ogrzewania się bowiem rekuperatorów wszystkie ich elementy rozszerzają się i przesuwiają miejsca styku z kształtkami sąsiednimi. Podczas stygnięcia zaś kurczą się, przy czym kurczenie każdego z nich odbywa się prawie niezależnie od innych, wywołując przez to rozrywanie się (rozchodzenie się) pionowych spoin pomiędzy poszczególnymi elementami rekuperatora.

Przy pionowym układaniu elementów rekuperatora powstają spoiny poziome, których szczelność jest znacznie większa, ponieważ na powierzchni styku działa ciśnienie górnych warstw. Z tego powodu obecnie stosuje się najczęściej takie konstrukcje rekuperatorów ceramicznych, w których elementy fasonowe są ustawiane pionowo, a spoiny są poziome.

Pomimo szlifowania powierzchni styków i starannego układania rur, cegieł fasonowych i bloków, rekuperatory ceramiczne nawet ze spoinami poziomymi posiadają stosunkowo małą szczelność, która w dodatku zmniejsza się w miarę przedłużania się czasu ich pracy. Jak wykazała praktyka, przepływ powietrza przez nieszczelności w nowych, niedawno wybudowanych rekuperatorach wynosi tylko 10—12% początkowej jego ilości, a następnie w miarę upływu czasu stopniowo się powiększa i dochodzi w starych rekuperatorach do 30—40%.

Biorąc powyższe pod uwagę, w celu zmniejszenia ilości powietrza przepływającego do gazów spalinowych przez nieszczelności należy utrzymywać w rekuperatorach ceramicznych małą różnicę ciśnień pomiędzy powietrzem i spalinami. Osiąga się to przez utrzymanie niskiego ciśnienia w kanałach rekuperatora ceramicznego, a więc i małych prędkości zarówno powietrza, jak i gazów spalinowych. Małe prędkości środowisk oraz duży opór cieplny przegrody (ścianki), która je rozdziela, wyjaśniają, dlaczego współczynniki wymiany ciepła w rekuperatorach ceramicznych są stosunkowo niskie i wahają się w granicach od 2 do 6 kcal/m² · godz · °C.

Ciąg w piecach przemysłowych z rekuperatorami ceramicznymi uzyskuje się zwykle za pomocą komina, wskutek czego w kanałach dymowych rekuperatorów ceramicznych panuje ciśnienie niższe niż ciśnienie atmosferyczne. W celu uzyskania małej różnicy ciśnień pomiędzy powietrzem i gazami spalinowymi pożądane jest, aby w kanałach powietrznych ciśnienie było również mniejsze od ciśnienia atmosferycznego. Z tego powodu, jeżeli inne ważne względy nie stoją na przeszkodzie, wentylator powietrzny należy ustawić za rekuperatorem ceramicznym, a nie przed nim, tj. powinien on wysysać gorące powietrze z rekuperatora, a nie tłoczyć powietrze zimne. Oczywiście, jest to możliwe tylko wtedy, gdy powietrze ogrzewa się w rekuperatorze najwyżej do temp. 500—600°C, ponieważ wentylatorów pracujących z powodzeniem przy temperaturach wyższych nie spotyka się.

Poszukiwanie dobrych rozwiązań konstrukcyjnych rekuperatorów ceramicznych o możliwie dużej szczelności i podgrzewających powietrze do wysokich temperatur rzędu 700—1000°C dało w rezultacie sporo różniących się od siebie konstrukcji.

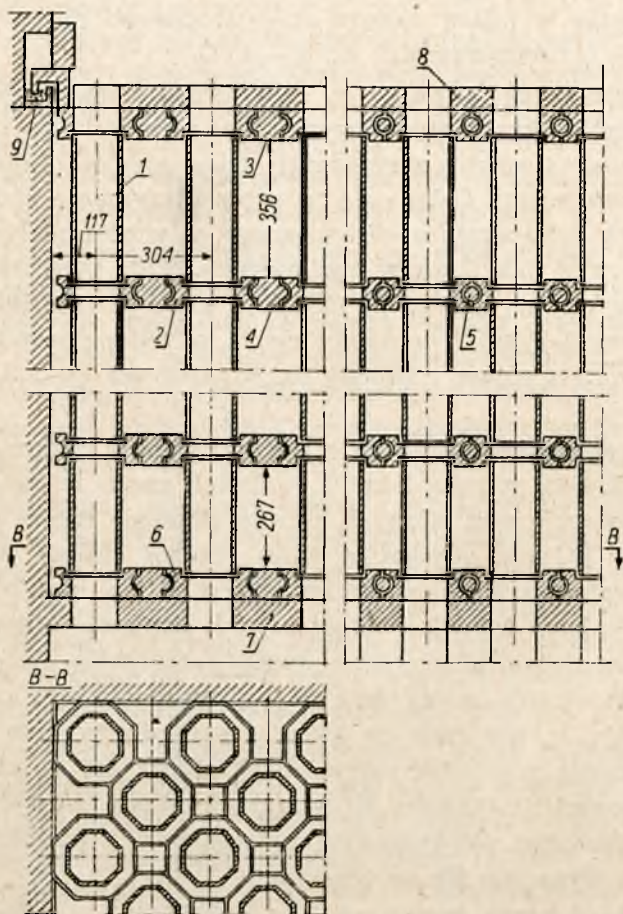
Do najbardziej udanych należy zaliczyć następujące rekuperatory:

1. rekuperator z rur ceramicznych (rys. IV-15 i IV-16),
2. rekuperator z bloków ceramicznych (rys. IV-17 i IV-18),
3. rekuperator z kształtek (z cegieł fasonowych) (rys. IV-19 i IV-20).

Ostatnio rekuperatory z rur ceramicznych znalazły stosunkowo szerokie zastosowanie w piecach metalurgicznych do ogrzewania bloków stalowych oraz w niektórych piecach stosowanych w przemyśle che-

micznym i w przemyśle materiałów budowlanych. Jeden z takich rekuperatorów jest przedstawiony na rys. IV-15.

Gazy spalinowe przechodzą przez rury tego rekuperatora z góry na dół, powietrze zaś opływa je z zewnątrz, płynąc poziomo. Zaczyna ono swój ruch w dolnym kanale rekuperatora i zmieniając kilka razy kie-



Rys. IV-15. Rekuperator z rur ceramicznych: 1 — rury, 2 — pierścienie stykowe, 3 — pierścienie górne, 4 — przegrody, 5 — korki ceramiczne, 6 — pierścienie dolne, 7 — dolne płytki oporowe, 8 — górne płytki, 9 — zamknięcie piaskowe

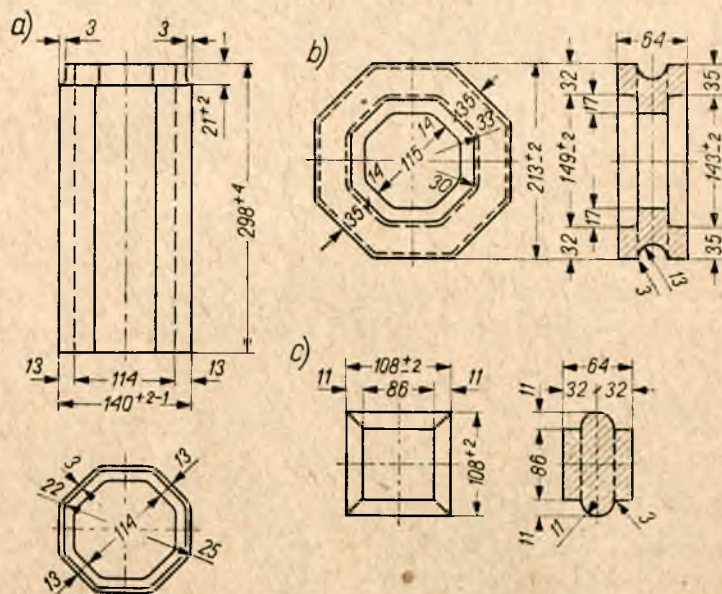
runek poziomy o 180°C , przechodzi za każdym razem do kanałów położonych wyżej, opuszczając rekuperator góra.

Ceramiczne rury rekuperatora mają przekrój ośmioboku (rys. IV-16 a). Są one wykonane z karboszamotu i z szamotu. Rury karboszamotowe, jako bardziej odporne na wysokie temperatury, są ustawione w dwóch górnych rzędach rekuperatora, szamotowe zaś rury — w pozostałych, gdzie temperatury są niższe. Grubość ścianek rur szamotowych wynosi

13 mm, a karboszametowych — 16 mm. Jedne i drugie są wykonywane o długościach 298 i 387 mm.

Rury łączy się ze sobą za pomocą specjalnych pierścieni stykowych (rys. IV-16 b) przy użyciu odpowiedniej zaprawy. Dla otrzymania poziomych kanałów powietrznych i w celu uniemożliwienia przepływu powietrza wzdłuż rur rekuperatora wstawia się pomiędzy pierścienie przegrody poprzeczne (rys. IV-16 c).

W omawianym rekuperatorze (rys. IV-15) w najgorszych warunkach temperaturowych pracują górne rzędy rur ceramicznych, na które dzia-

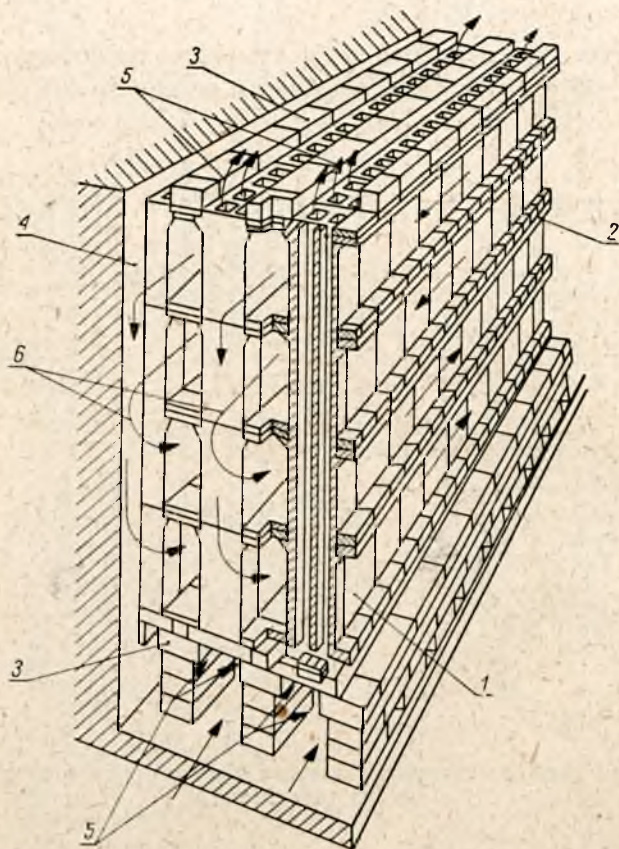


Rys. IV-16. Rury i kształtki rekuperatora ceramicznego: a) rura, b) pierścień stykowy, c) przegroda

łają gazy spalinowe o najwyższej temperaturze i które są narażone na promieniowanie przestrzeni przedrekuperacyjnej. W złych warunkach pracują również rury ceramiczne najniższego rzędu, na które działa powietrze o najniższej temperaturze i z tego powodu w ściankach tych rur zachodzi największy spadek temperatur. Tym się tłumaczy przyczynę ustawiania w pierwszych dwóch górnych rzędach, a czasami i w ostatnim, rur wykonywanych z bardziej odpornego na wysokie temperatury karboszametotu.

Szereg rekuperatorów z rur ceramicznych omawianej konstrukcji pracuje z powodzeniem w piecach metalurgicznych do ogrzewania bloków stalowych. Powietrze w tych rekuperatorach jest ogrzewane do temp. 800—850°C gazami spalinowymi o temp. 1200—1250°C.

Do pomyslnych rozwiązań konstrukcyjnych można zaliczyć rekuperator ceramiczny przedstawiony na rys. IV-17. Jest on wykonany z bloków szamotowych o czterech kanałach powietrznych (rys. IV-18). Bloki powyższe są ustawione jeden na drugim w taki sposób, że kanały każdego bloku są przedłużeniem kanałów bloku poprzedniego. Bloki przylega-

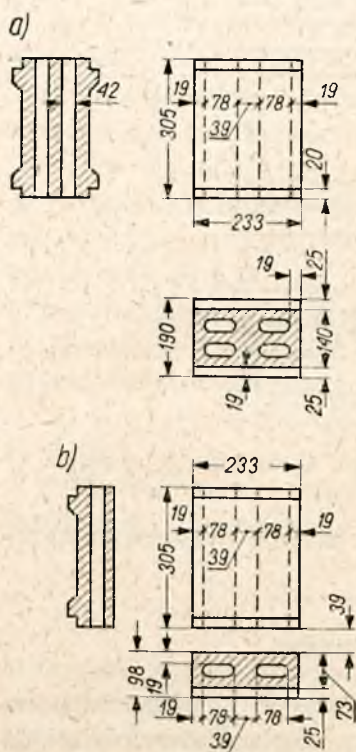


Rys. IV-17. Rekuperator z bloków ceramicznych: 1 — blok, 2 — przegrody, 3 — górne i dolne płyty, 4 — półblok, 5 — powietrze, 6 — gazy spalinowe

jące do ścian zewnętrznych kaloryfera posiadają tylko dwa kanały (rys. IV-18 b). Ich ściany zewnętrzne są gładkie.

Powietrze w rozpatrywanym rekuperatorze płynie kanałami pionowymi z dołu do góry, gazy spalinowe zaś — kanałami poziomymi o znacznie większym przekroju. Charakterystyczną cechą tego rekuperatora jest brak spoin pionowych w ścianach oddzielających kanały powietrzne od spalinowych, co sprzyja osiągnięciu dobrej szczelności. Spoiny poziome na końcach bloków są uszczelniane za pomocą specjalnych płytek na odpowiedniej zaprawie, oznaczonych na rys. IV-17 liczbą 2.

Zaletą rekuperatora z bloków szamotowych (rys. IV-17) w porównaniu z rekuperatorem z rur ceramicznych (rys. IV-15) jest mniejsza liczba różniących się od siebie kształtek i łatwiejszy z tego powodu montaż, natomiast wadą jest nieco gorsza szczelność, a poza tym słabsza wymiana ciepła.

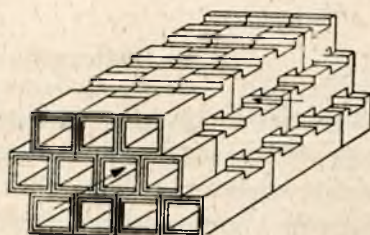


Rys. IV-18. Bloki do rekuperatora ceramicznego:
a) blok z czterema kanałami,
b) blok z dwoma kanałami (półblok)

Rekuperatory z bloków ceramicznych omawianej konstrukcji ogrzewają powietrze do temperatury rzędu 500—550°C przy temperaturze dopływających gazów spalinowych, wynoszącej 850—900°C.

Pod względem konstrukcyjnym zbliżone do rekuperatorów z bloków ceramicznych są rekuperatory z cegieł fasonowych. Jeden z takich rekuperatorów jest przedstawiony na rys. IV-19, a poszczególne cegły dwóch różnych wymiarów — na rys. IV-20.

W powyższym rekuperatorze (rys. IV-19) gazy spalinowe i powietrze płyną kanałami poziomymi w kierunkach do siebie prosto-

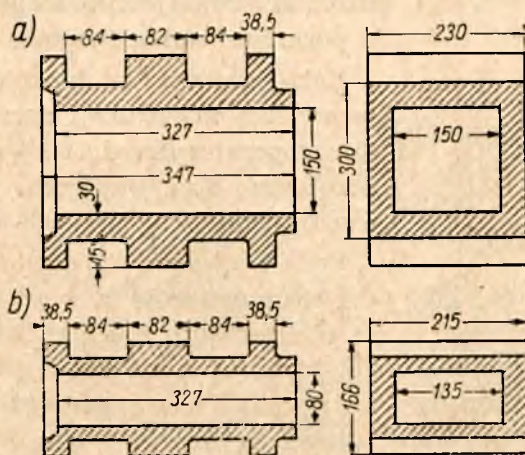


Rys. IV-19. Rekuperator z kształtek ceramicznych

padłych. Dla uzyskania większej szczelności spoiny pionowe są kryte. Uzyskuje się to przez łączenie jego kształtek (rys. IV-20), wsuwając zwężony koniec jednej kształtki (cegły) w rozszerzony otwór kształtki drugiej, podobnie jak się łączy rury kielichowe.

W porównaniu z omawianym poprzednio rekuperatorem z bloków ceramicznych (rys. IV-17) rekuperator przedstawiony na rys. IV-19 ma bardziej zwartą budowę, ponieważ jego powierzchnia ogrzewalna przy ceglach o mniejszych wymiarach wynosi od strony gazów spalinowych 11,5 m²/m³, gdy powierzchnia ogrzewalna rekuperatora z bloków ceramicznych — tylko 6,53 m²/m³, a od strony powietrza — 10,1 m²/m³, gdy w rekuperatorze zaś z bloków ceramicznych — 7,8 m²/m³.

Wadą rekuperatora z kształtek szamotowych jest duży opór wskutek kilkakrotnej zmiany kierunku przepływu gazów spalinowych, który muszą pokonywać przepływające przez rekuperator powietrze. Opór ten jest



Rys. IV-20. Kształtki do rekuperatora ceramicznego: a) większa, b) mniejsza

szczególnie szkodliwy, gdy instalacja piecowa pracuje przy ciągu naturalnym.

5. Obliczanie rekuperatorów

Obliczanie rekuperatorów jest oparte na bilansach — materiałowym i cieplnym oraz na ogólnych prawach wymiany ciepła. Celem obliczania jest ustalenie wielkości powierzchni ogrzewalnej rekuperatora, gdy znane są początkowe i końcowe temperatury gazów spalinowych i powietrza, albo ustalenie końcowych temperatur powietrza i spalin, gdy znane są ich początkowe temperatury oraz powierzchnia ogrzewalna rekuperatora.

Z bilansu cieplnego rekuperatora określa się ilość ciepła Q przekazanego przez gazy spalinowe ogrzewanemu powietrzu. Wynosi ona, jak wynika z równania opartego na bilansie cieplnym,

$$Q = V''_{pom} \cdot c''_{pom} \cdot t''_{pom} - V'_{pom} \cdot c'_{pom} \cdot t'_{pom} = (1 - \varphi)(V'_g \cdot c'_g \cdot t'_g - V''_g \cdot c''_g \cdot t''_g) \text{ kcal/godz} \quad [\text{IV-1}]$$

gdzie: V'_{pom} i V''_{pom} — objętość powietrza wchodzącego i wychodzącego z rekuperatora w Nm^3/godz ,

V'_g i V''_g — objętość gazów spalinowych wchodzących i wychodzących z rekuperatora w Nm^3/godz ,

c'_{pom} i c''_{pom} — średnie ciepła właściwe przy stałej prężności powietrza przy wlocie i wylocie z rekuperatora w $\text{kcal}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$,

c'_g i c''_g — średnie ciepła właściwe przy stałej prężności gazów spalinowych przy wlocie i wylocie z rekuperatora w $\text{kcal/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$,

t'_{pom} i t''_{pom} — temperatury powietrza przy wlocie i wylocie gazów z rekuperatora w $^\circ\text{C}$,

t'_g i t''_g — temperatury gazów spalinowych przy wlocie i wylocie z rekuperatora w $^\circ\text{C}$,

φ — współczynnik strat cieplnych w rekuperatorze przez promieniowanie i przewodnictwo nieużyteczne.

Straty ciepłne przez promieniowanie i przewodnictwo nieużyteczne w rekuperatorach w zależności od ich konstrukcji i rodzaju izolacji cieplnej wynoszą od 5 do 15%, wobec czego wartość współczynnika φ równa się od 0,05 do 0,15.

Przy obliczaniu objętości V''_{pom} powietrza i V''_g gazów spalinowych opuszczających rekuperator należy uwzględnić, że część powietrza przepływa wskutek szczelności do kanałów gazowych, wobec czego

$$V''_{pom} < V'_{pom}, \text{ a } V''_g > V'_g$$

Powierzchnię ogrzewalną rekuperatorów można obliczyć w sposób uproszczony, posługując się następującym ogólnie znanym wzorem:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Theta_{sr}} \quad \text{m}^2 \quad \text{[IV-2]}$$

Średnią różnicę temperatur Θ_{sr} pomiędzy gazami spalinowymi i powietrzem oblicza się zwykle przy pomocy znanego w teorii wymiany ciepła wzoru logarytmicznego, który w zastosowaniu do rekuperatorów współprądowych ma postać

$$\Theta_{sr} = \frac{(t'_g - t'_{pom}) - (t''_g - t''_{pom})}{2,3 \lg \frac{t'_g - t'_{pom}}{t''_g - t''_{pom}}} \quad ^\circ\text{C} \quad \text{[IV-3]}$$

a w zastosowaniu do rekuperatorów przeciwprądowych ma postać następującą:

$$\Theta_{sr} = \frac{(t'_g - t''_{pom}) - (t''_g - t'_{pom})}{2,3 \lg \frac{t'_g - t''_{pom}}{t''_g - t'_{pom}}} \quad ^\circ\text{C} \quad \text{[IV-4]}$$

W przypadku prądów skrzyżowanych Θ_{sr} oblicza się jako średnią arytmetyczną różnicę temperatur z różnic temperatur przy wlocie i wylocie gazów spalinowych.

Gdy przy prądach skrzyżowanych występuje w rekuperatorach również przeciwprąd, średnią różnicę temperatur oblicza się tak jak dla rekuperatorów przeciwprądowych.

Wielkość współczynnika wymiany ciepła k oblicza się ze wzoru

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{pow}} \quad [IV-5]$$

gdzie: α_g — cząstkowy współczynnik przenikania ciepła od gazów spalinowych do ściany w $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C}$,

α_{pow} — cząstkowy współczynnik przenikania ciepła od ściany do powietrza w $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C}$,

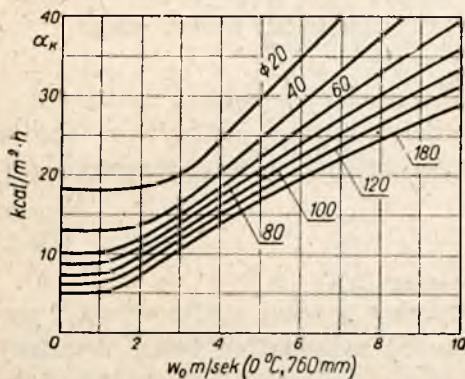
δ — grubość ściany oddzielającej kanały spalinowe od powietrznych w m,

λ — przewodnictwo właściwe materiału ściany w $\text{kcal/m} \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C}$.

Cząstkowe współczynniki przenikania ciepła α_g i α_{pow} zależą, jak wiadomo, od prędkości powietrza i gazów w_0 sprowadzonej do temp. 0°C

i ciśnienia 760 mm Hg oraz od średnicy kanału d . Jeżeli przekrój poprzeczny kanału nie jest okrągły, to zamiast średnicy d przyjmuje się średnicę zastępczą, równą czterem promieniom hydraulicznym.

Zwykle prędkość w_0 powietrza i gazów spalinowych w rekuperatorach ceramicznych wynosi od 0,5 do 2 Nm/sek, w rekuperatorach metalowych zaś prędkość powietrza wynosi od 5 do 15 Nm/sek, a gazów spalinowych od 1 do 5 Nm/sek.



Rys. IV-21. Współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję α_k dla rur i kanałów

Na rys. IV-21 podany jest wykres zależności cząstkowych współczynników przenikania ciepła α_k od prędkości w_0 powietrza i gazów spalinowych dla kanałów o różnej średnicy. Ponieważ powietrze prawie nie zawiera dwutlenku węgla i pary wodnej, można przyjmować przy obliczaniu rekuperatorów, że $\alpha_{pow} = \alpha_k$, natomiast dla gazów spalinowych

$$\alpha_g = \alpha_k + \alpha_{pr} \quad [IV-6]$$

gdzie α_{pr} oznacza współczynnik wymiany ciepła przez promieniowanie pomiędzy gazami spalinowymi i ścianą w $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C}}$ (patrz rozdz. III wzory [III-21], [III-22], [III-23]).

Wyniki obliczeń sumarycznego współczynnika wymiany ciepła k dają wartości leżące w granicach od 2 do 6 $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C}$ dla rekuperatorów ceramicznych i od 10 do 25 $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C}$ dla rekuperatorów metalowych.

Przy obliczaniu rekuperatorów oprócz powierzchni ogrzewalnej F wyznacza się również temperaturę ścian ze względu na niebezpieczeństwo ich przepalenia. W rekuperatorach przeciwprądowych miejsca, gdzie gazy spalinowe wchodzi do rekuperatora, są najbardziej narażone na przepalenie, w rekuperatorach zaś współprądowych temperatura ścian może być za wysoka również i w tych miejscach, w których gazy spalinowe opuszczają rekuperator.

Temperaturę na powierzchni ścian płaskich od strony gazów spaliny-
wych t'_{sc} oblicza się ze wzoru

$$t'_{sc} = t'_g - \frac{k}{\alpha_g} (t'_g - t''_{pom}) \quad ^\circ\text{C} \quad [\text{IV-7}]$$

a od strony powietrza t''_{sc} ze wzoru

$$t''_{sc} = t''_{pom} + \frac{k}{\alpha_{pow}} (t'_g - t''_{pom}) \quad [\text{IV-8}]$$

W rekuperatorach metalowych temperatura powierzchni ścian od stro-
ny spalin i powietrza mało różnią się od siebie.

Różnica temperatur na powierzchni ścian od strony gazów spalino-
wych i powietrza ma duże znaczenie dla rekuperatorów ceramicznych,
ponieważ wskutek niejednakowego rozszerzania pod wpływem różnych
temperatur w kształtkach rekuperatorów ceramicznych mogą powstawać
pęknięcia.

Wytrzymałość termiczną kształtek szamotowych sprawdza się przy po-
mocy wzoru

$$k (t'_g - t'_{pom}) \delta < 8200 \quad [\text{IV-9}]$$

6. Regeneratory

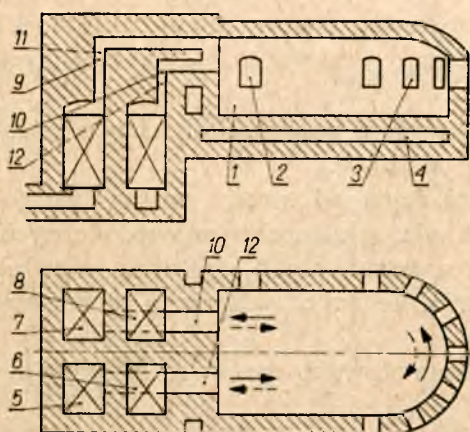
Wymiana ciepła w regeneratorach, jak już było poprzednio wspomnia-
ne, odbywa się w sposób okresowy za pośrednictwem wypełnienia, które
akumuluje ciepło pobierane od gazów spalinowych podczas biegu gorą-
cego i oddaje go powietrzu lub paliwu gazowemu podczas biegu zimnego.

Działanie regeneratorów można z grubsza wyjaśnić, rozpatrując piec
szklarski przedstawiony na rys. IV-22 i IV-23. Na rys. IV-22 podano
schematycznie wannowy piec szklarski, a na rys. IV-23 — schemat po-
łączeń regeneratorów tego pieca z jego komorą roboczą i kominem.

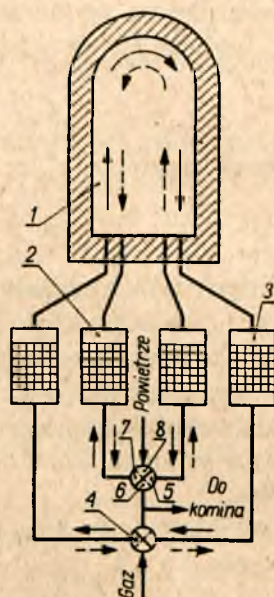
Komora robocza pieca szklarskiego przedstawionego na rys. IV-22 ma
kształt długiej, ale stosunkowo płytkiej wanny 1 o szerokości od 3 do
5 m, długości do 20 m i głębokości od 0,8 do 1,4 m, która zawiera rozto-
pioną masę szklarską. Mieszanka surowców jest okresowo doprowadza-
na do pieca przez otwory wsadowe 2 w miarę pobierania masy szklar-
skiej przez okna robocze 3.

Piec jest ogrzewany gazem generatorowym. Spalanie zachodzi we-
wnątrz komory roboczej nad powierzchnią roztopionego szkła. Dla uzy-

skania potrzebnej do wytapiania szkła wysokiej temperatury paliwo gazowe i powietrze są podgrzewane w regeneratorach. W tym celu przepuszcza się je przed wprowadzeniem do komory przez regeneratory 5 i 6, gdzie ogrzewają się do temperatury kilkuset stopni Celsjusza i następnie wchodzą kanałami 11 i 12 do komory piecowej z dość dużą prędkością. Tam spotykają się i spalają się długim płomieniem.



Rys. IV-22. Wannowy piec szklarski: 1 — wanna, 2 — okno do ładowania, 3 — okna robocze, 4 — kanał do studzenia dna, 5, 7 — regeneratory powietrzne, 6, 8 — regeneratory do paliwa gazowego, 9, 10, 11, 12 — kanały

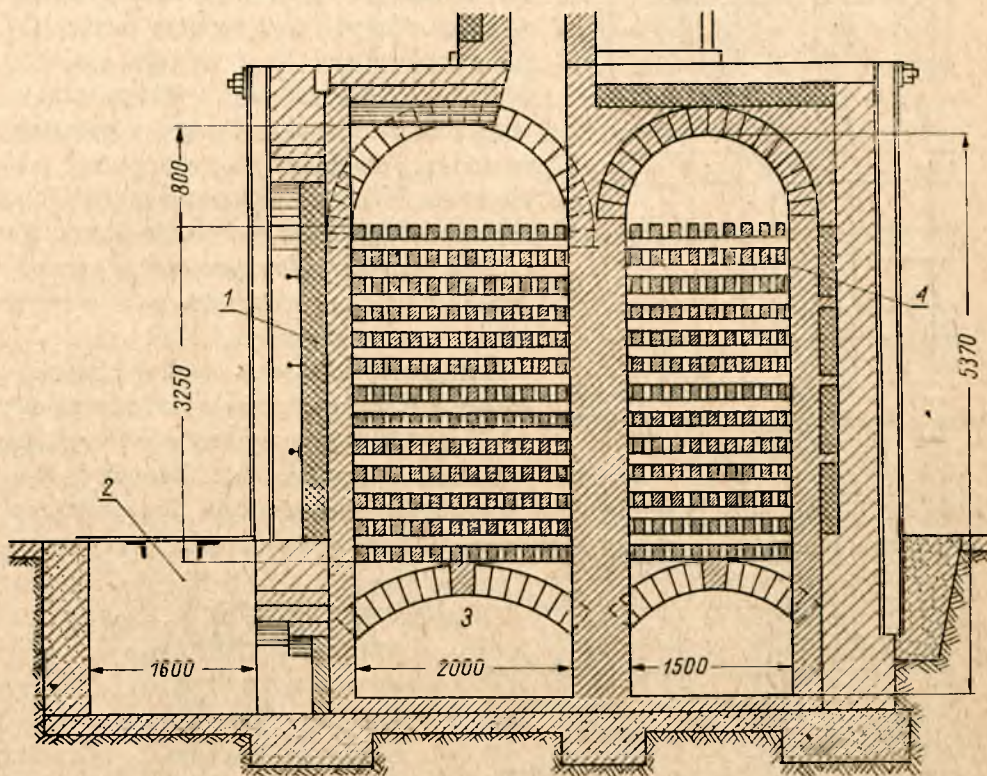


Rys. IV-23. Schemat połączeń regeneratorów: 1 — piec, 2 — regeneratory powietrzne, 3 — regeneratory gazowe, 4 — zawory rozrządowe, 5, 7 — kanały połączone z prawym lub lewym regeneratorem powietrznym, 6 — kanał połączony z kominem, 8 — kanał połączony z atmosferą

Gazy spalinowe opuszczają komorę roboczą kanałami 9 i 10, następnie przepływają przez regeneratory 7 i 8, gdzie oddają znaczną część zawartego w nich ciepła i uchodzą do komina.

Taki przepływ powietrza, paliwa gazowego i gazów spalinowych trwa zwykle od 20 do 30 min, po czym kierunek ich przepływu zmienia się na odwrotny — gaz generatorowy i powietrze wchodzi do pieca przez regeneratory 7 i 8 oraz kanały 9 i 10, a gazy spalinowe opuszczają go kanałami 11 i 12, przy czym przez regeneratory 5 i 6 płyną do komina. Zmiana kierunku gazów przepływających przez piec odbywa się za pomocą zaworów rozrządczych (rys. IV-23), kierujących gaz palny, powietrze i spaliny do właściwych kanałów.

Regeneratory powietrzny (większy) i gazowy (mniejszy) są przedstawione na rys. IV-24. Są to wąskie, lecz wysokie komory wypełnione zwykle cegłą ogniotrwałą, rzadziej — specjalnymi kształtkami ceramicznymi w celu rozwinięcia większej powierzchni. Cegły są ułożone na dolnym sklepieniu ażurowym posiadającym poprzeczne szczeliny. Pod sklepieniem tym znajduje się kanał dolny, przez który podczas biegu zimnego doprowadza się pod wypełnienie ogrzewane powietrze (lub gaz



Rys. IV-24. Regeneratory: 1 — obmurze, 2 — dół do wjazdu, 3 — kanał dolny, 4 — wypełnienie

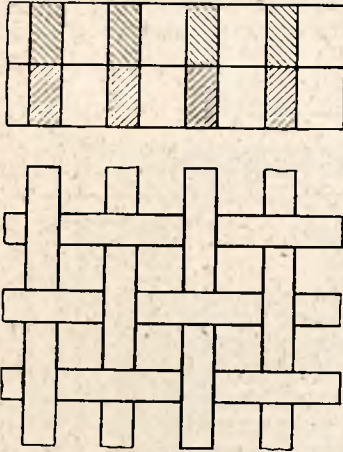
palny) i odprowadza się oziębione gazy spalinowe w czasie biegu gorącego.

Ułożenie cegieł stanowiących wypełnienie większości regeneratorów powinno być takie, aby przez nie mogły swobodnie przepływać gazy zwykle w kierunku pionowym, rzadziej w kierunku poziomym. Najczęściej spotykane rodzaje ułożenia cegieł w regeneratorach z pionowym kierunkiem przepływu gazów zostały zaproponowane przez Cowpera (rys. IV-25) i Siemens'a (rys. IV-26).

Wypełnienie Cowpera (rys. IV-25), posiadające ciągłe kanały pionowe, stawia stosunkowo małe opory przepływającym przez nie gazom, ponieważ nie zmieniają one swojej prędkości ani kierunku. Jest ono dość

trwałe i stosunkowo rzadko ulega zanieczyszczeniu sadzą lub pyłem. W przypadku zanieczyszczenia któregoś z kanałów wyłącza się on samoczynnie z ruchu, co nie następuje w wypełnieniach innych typów.

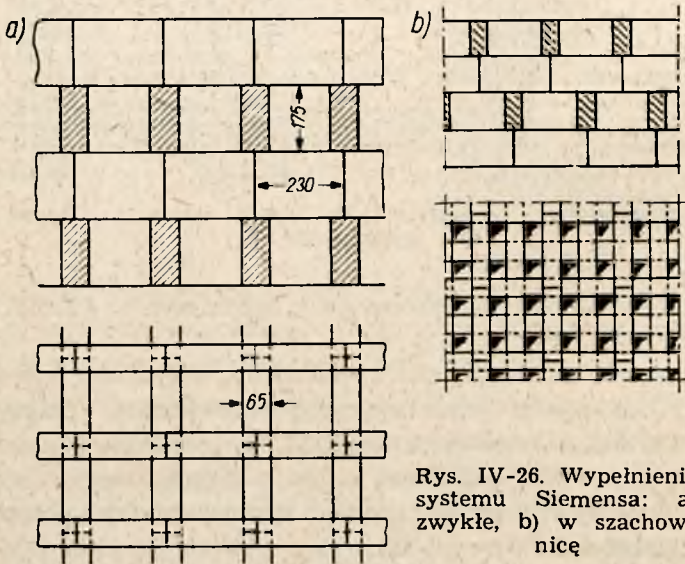
W wypełnieniu Siemens'a zwykłym (rys. IV-26a) i w szachownicę (rys. IV-26 b) gazy po przejściu przez każdy szereg cegieł zmieniają swoją prędkość i kierunek, co wskutek powstawania wirów dodatnio wpływa na wymianę ciepła, ale znacznie powiększa opory. Powierzchnia ogrzewalna przypadająca na 1 m³ wypełnienia systemu Siemens'a jest większa niż w wypełnieniu systemu Cowpera wskutek posiadania swobodnych powierzchni poziomych. W przypadku zanieczyszczenia się sadzą i pyłem wypełnienie Siemens'a można oczyszczać w czasie pracy przedmuchiwać je sprężonym powietrzem lub strumieniem pary.



Rys. IV-25. Wypełnienie systemu Cowpera

Odległość pomiędzy cegłami wypełnienia z kanałami pionowymi równa się od 60 do 100 mm, a ogólna powierzchnia przekroju poprzecznego kanałów wynosi od 60 do 40% przekroju poprzecznego regeneratora. Zmniejszenie

odległości pomiędzy cegłami powiększa niebezpieczeństwo zanieczyszczenia



Rys. IV-26. Wypełnienie systemu Siemens'a: a) zwykłe, b) w szachownicę

regeneratorów, natomiast polepsza wymianę ciepła przez konwekcję, pogarszając równocześnie wymianę ciepła przez promieniowanie.

Cegły i kształtki ceramiczne, z których są układane wypełnienia regeneratorów, powinny mieć dużą odporność na działanie żuźla oraz wysokich temperatur, dobre przewodnictwo właściwe, dużą pojemność cieplną, odporność na zmiany temperatury oraz odpowiednią wytrzymałość mechaniczną na ściskanie pod ciężarem górnych warstw, ponieważ wysokość wypełnienia wynosi od 3 do 4 m, a w wyjątkowych przypadkach — nawet więcej.

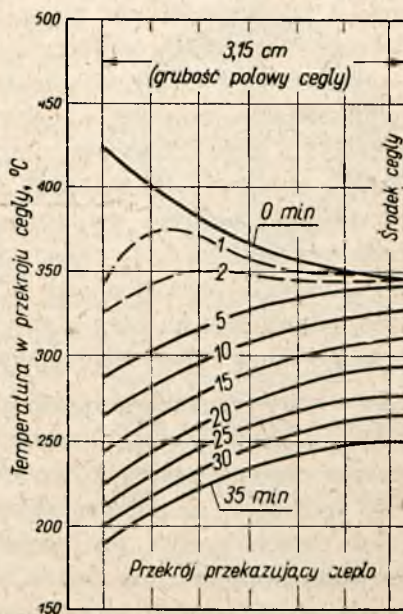
Powyższym warunkom odpowiada cegła szamotowa, która wskutek tego jest w regeneratorach powszechnie stosowana. W górnych warstwach wypełnienia, gdzie temperatura cegieł dochodzi do 1200°C , są używane cegły szamotowe wysokiego gatunku, w dolnych zaś, gdzie temperatura nie przekracza 350°C , od cegły szamotowej wymaga się tylko dużej wytrzymałości mechanicznej, pozostałe zaś jej własności nie powinny być gorsze od własności normalnych.

W szczególnych przypadkach wypełnienie regeneratorów wykonuje się z cegieł magnezytowych i dynasowych.

Wskutek okresowej pracy regeneratorów piece posiadają dwa regeneratory, gdy jest ogrzewane tylko powietrze, a w przypadku gdy oprócz powietrza ogrzewa się również i paliwo gazowe, jak w rozpatrywanym poprzednio piecu szklarskim (rys. IV-22), potrzebna liczba rekuperatorów wynosi 4.

Bezpośrednio po przestawieniu zaworów i wprowadzeniu od dołu do rozgrzanego regeneratora zimnego powietrza następuje stopniowe ochładzanie cegieł wypełnienia początkowo dość szybkie, później — coraz wolniejsze. Temperatura, do której ogrzewa się powietrze, z biegiem czasu również się obniża. Przy powtórnym przestawieniu zaworów dopływające do regeneratora gorące gazy spalinowe ogrzewają wypełnienie początkowo bardzo szybko, później coraz wolniej, przy czym temperatura spalin opuszczających regenerator stopniowo się podnosi.

Z powyższego wynika, że w regeneratorach podczas ich normalnej pracy nie powstaje ani na chwilę równowaga cieplna. Temperatura na powierzchni i wewnątrz cegieł, z których składa się wypełnienie, bez przerwy się zmienia. Na rys. IV-27 przedstawiono w sposób graficzny zmianę temperatury na powierzchni i wewnątrz cegły o grubości 63 mm podczas biegu zimnego regeneratora od momentu



Rys. IV-27. Zmiana temperatury wewnątrz cegły w zależności od czasu

wprowadzenia do niego powietrza. W wykresu tego wynika, że na początku okresu oziębiania temperatura na powierzchni cegły jest wyższa niż wewnątrz niej, lecz przepływające powietrze bardzo szybko obniża temperaturę warstwy powierzchniowej. Wkrótce (jak wykazuje wykres temperatur po upływie 1 min) temperatura głębszych warstw cegły staje się wyższa niż w jej wnętrzu i na powierzchni. Wtedy przez pewien krótki okres czasu wewnątrz cegły zachodzi ruch ciepła w dwóch kierunkach do powierzchni i do wnętrza cegły. Następnie po upływie krótkiego okresu czasu (jak wykazują wykresy temperatur po upływie 5, 10, ... minut) temperatura wewnątrz cegły staje się najwyższa i ruch ciepła w cegle odbywa się od jej wnętrza do powierzchni zewnętrznej.

Analogiczne zjawiska, lecz w odwrotnym kierunku, zachodzą w regeneratorze podczas biegu gorącego, czyli podczas przepływu przez niego gazów spalinowych. W regeneratorze więc, jak wynika z powyższego, odbywają się jednocześnie dwa związane ze sobą procesy wymiany ciepła, a mianowicie ruch ciepła od cegły do powietrza, ewentualnie od gazów spalinowych do cegły, oraz ruch ciepła wewnątrz cegły.

W związku z tym duże znaczenie ma grubość cegieł, z których wykonuje się wypełnienie regeneratorów. Zwykle wynosi ona od 50 do 75 mm. W cegłach grubszych środkowa ich część nie bierze udziału w wymianie ciepła oraz zwiększa nieużytecznie objętość i ciężar wypełnienia. Przez stosowanie cegieł cieńszych zwiększa się powierzchnię ogrzewalną regeneratorów, natomiast skraca się okres czasu ich ogrzewania i studzenia oraz obniża się wytrzymałość mechaniczna na ściskanie dolnych warstw wypełnienia. Więc czas trwania pełnego okresu pracy regeneratora, tj. biegu gorącego i zimnego, zależy od grubości cegły. Zwykle wynosi on od 40 do 60 min. Przystawienie regeneratorów z biegu gorącego na bieg zimny wymaga zmiany kierunku ruchu gazów, do czego służą odpowiednie zawory (rys. IV-23).

Zawory przeznaczone do zmiany kierunku ruchu gazów można podzielić na dwie grupy — zawory pojedyncze służące do włączania i wyłączenia danego gazu (np. powietrza, paliwa gazowego lub spalin) i zawory podwójne, za pomocą których można jednocześnie zmienić kierunek ruchu dwóch gazów (np. powietrza i gazów spalinowych lub paliwa gazowego i spalin).

Zawory pojedyncze są to zasuwki i zawory tarczowe (talerzowe), które otwierają i zamykają odpowiednie kanały.

Bębnowy zawór podwójny stosowany do jednoczesnej zmiany kierunku ruchu powietrza i gazów spalinowych jest przedstawiony na rys. IV-28. Składa się on z żeliwnego pierścienia 1 stanowiącego jedną całość z krzyżem 2, przy czym przekroje poprzeczne pierścienia i krzyża mają kształt rynny, oraz z bębna stalowego 3 zaopatrzonego w przegrodę poprzeczną 4.

Krzyż jest ustawiony na murowanych przegrodach oddzielających od siebie wyloty czterech kanałów, z których jeden 5 jest połączony z prawym regeneratorem powietrznym (rys. IV-23), drugi 6 — z kominem, trzeci 7 — z lewym regeneratorem powietrznym (rys. IV-23), czwarty zaś 8 — z przewodem doprowadzającym powietrze. W momencie przedstawionym na rys. IV-23 i IV-28 gazy spalinowe płyną kanałem 5 z prawego regeneratora poprzez zawór bębnowy (rys. IV-28) do komina, a powietrze dopływa poprzez zawór do regeneratora lewego. Dla zmiany kierunku ruchu powietrza i spalin należy przestawić bęben tak, aby jego przegroda poprzeczna zajęła położenie poziome. W tym celu podnosi się bęben na taką wysokość, ażeby przegroda poprzeczna wyszła z krzyża i następnie po obrocie o 90° opuszcza się go na pierścień i krzyż.

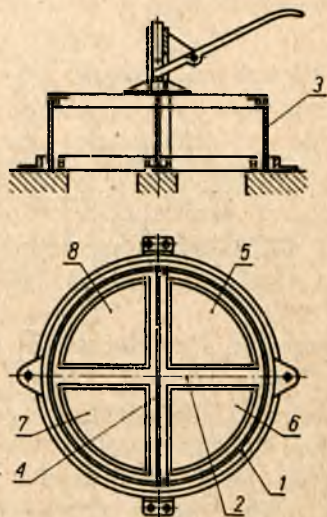
W nowym położeniu bęben łączy ze sobą kanały 5 i 8 oraz 6 i 7. Powietrze wobec tego płynie z kanału 8 poprzez zawór do kanału 5 i dalej do regeneratora prawego, a gazy spalinowe — z regeneratora lewego poprzez zawór do komina.

Aby osiągnąć szczelność w zaworze bębnowym, krzyż i pierścień napełnia się wodą lub rzadziej — suchym, drobnym piaskiem. W ten sposób, gdy przegroda i bęben są zanurzone w wodzie, przepływające przez bęben gazy spalinowe i powietrze lub paliwo gazowe są szczelnie oddzielone od siebie i od otoczenia.

Przestawienie bębnowy powinno odbywać się możliwie szybko, szczególnie bębna zmieniającego kierunek ruchu paliwa gazowego, ponieważ w czasie obracania bębna kanał doprowadzający do pieca gaz palny łączy się z kominem, powodując stratę pewnej ilości paliwa.

Dość często do zmiany kierunku powietrza i gazów spalinowych stosuje się w piecach szklarskich przełącznik skrzydłowy przedstawiony na rys. IV-29. Powyższy przełącznik składa się z cylindrycznej lub prostopadłościenną komory 1 połączonej za pomocą żeliwnych kolan 2 i 3 z kanałami 4 i 5. Wewnątrz komory 1 znajduje się przegroda (skrzydło) 6, która może się obracać o 90° dookoła osi poziomej.

Przy położeniu skrzydła przedstawionym na rys. IV-29 powietrze płynie do pieca poprzez górny otwór komory 1, kolano 2, kanał 4 i lewy regenerator powietrzny. Produkty zaś spalania po wyjściu z pieca płyną do kolana 3 przez prawy regenerator i kanał 5, skąd kanałem 7 uchodzą do komina.

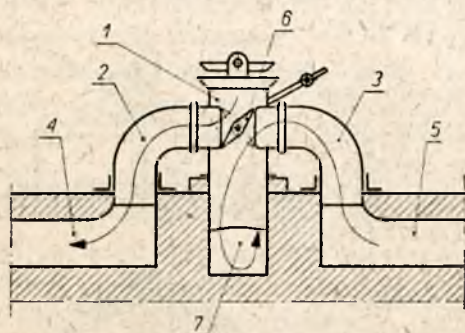


Rys. IV-28. Zawór bębnowy: 1 — pierścień, 2 — krzyż, 3 — bęben, 4 — przegroda poprzeczna 5, 7 — kanały połączone z prawym lub lewym regeneratorem powietrznym, 6 — kanał połączony z kominem, 8 — kanał połączony z atmosferą

Przy obrocie skrzydła o 90° do położenia zaznaczonego linią przerywaną powietrze płynie przez kolano 3 i kanał 5 do prawego regeneratora powietrznego, gazy zaś spalinowe przez lewy regenerator, kanał 4, kolano 2 i kanał 7 — do komina.

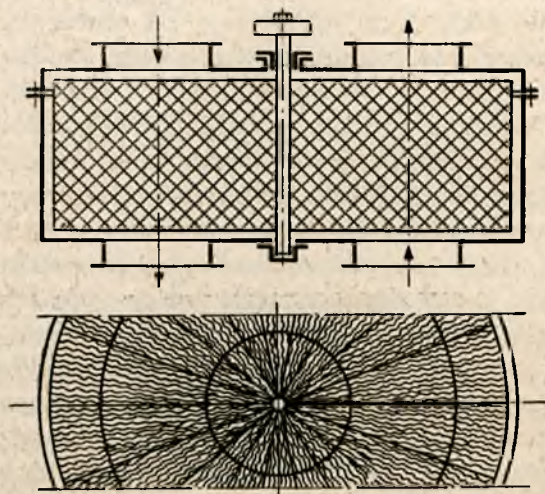
Przy stosowaniu omawianego przełącznika należy dbać o to, aby skrzydło szczelnie przylegało do obrzeży kolan 2 i 3, ponieważ w przeciwnym przypadku do komina zostanie zassane powietrze, co wpływa ujemnie na ciąg.

Regeneratory metalowe. Oprócz omówionych poprzednio regeneratorów ceramicznych o działaniu okresowym są stosowane do pod-



Rys. IV-29. Przełącznik skrzydłowy:
1 — komora, 2, 3 — kolana, 4, 5 — kanały, 6 — skrzydło, 7 — kanał do komina

grzewania powietrza również regeneratory metalowe o działaniu ciągłym. Z kilku różnych konstrukcji tego rodzaju regeneratorów na uwagę zasługuje regenerator Ljungstroema przedstawiony schematycznie na rys. IV-30.



Rys. IV-30. Regenerator mechaniczny Ljungstroema

Główną jego częścią jest wirnik obracający się dookoła osi pionowej wewnątrz dobrze izolowanej osłony wykonanej z blachy metalowej.

Wirnik jest zbudowany w postaci przestrzennej kratownicy wypełnionej falistymi lub gładkimi blachami stalowymi o grubości od 0,5 do

1 mm. Wypełnienie jest wykonane w taki sposób, że pomiędzy blachami swobodnie mogą przepływać gazy spalinowe i powietrze w kierunku równoległym do osi regeneratora. Wirnik obraca się stosunkowo wolno z prędkością od 3 do 6 obr/min. W czasie pracy przez jedną jego połowę przepływają z góry na dół gorące gazy spalinowe, ogrzewając wypełnienie (blachy stalowe), a przez drugą płynię z dołu do góry powietrze, które zabierając ciepło od blach energicznie je studzi, a samo się ogrzewa.

Duża powierzchnia ogrzewalna rozwinięta przez wypełnienie z blach oraz dobre w porównaniu z cegłą przewodnictwo stali pozwala w tym regeneratorze na dostateczne obniżenie temperatury spalin i podwyższenie temperatury powietrza przy stosunkowo małym zużyciu mocy (od 0,5 do 3 KM) i małych wymiarach w porównaniu z regeneratorami ceramicznymi.

Wadą regeneratora Ljungstroema jest mała odporność dość cienkiej blachy ze zwykłej stali węglowej na wysokie temperatury, co ogranicza jego zastosowanie. Wykonywanie zaś wypełnienia regeneratora ze stali ogniotrwałej znacznie zwiększa koszty instalacyjne. Drugą wadą jest trudność szczelnego oddzielenia strumienia powietrza od strumienia gazów spalinowych, w wyniku czego część powietrza przedostaje się do spalin. Wskutek niedostatecznej szczelności regeneratora Ljungstroema nie można stosować do ogrzewania paliwa gazowego.

7. Obliczanie regeneratorów

Dokładne obliczanie regeneratorów jest bardzo skomplikowane ze względu na nie ustalony w nich ruch ciepła. Dlatego też w praktyce stosowane są metody przybliżone, które dają jednak mniej dokładne wyniki.

Celem obliczeń jest ustalenie podziału ogrzewających gazów spalinowych pomiędzy regeneratory powietrzny i gazowy, określenie wielkości współczynnika wymiany ciepła, obliczenie powierzchni ogrzewalnej obu regeneratorów oraz oporu wypełnienia.

Ustalenie podziału gazów spalinowych pomiędzy regeneratory. Jeżeli znane są wymiary regeneratorów, to oblicza się temperatury, do których można w nich ogrzać powietrze i paliwo gazowe oraz temperaturę spalin opuszczających regeneratory.

Ze względu na gospodarkę cieplną pożądane jest ogrzewanie w regeneratorach powietrza i paliwa gazowego do możliwie wysokich temperatur. Jest to jednak związane z dużymi wymiarami regeneratorów oraz ze znacznymi stratami ciepła wskutek promieniowania i nieszczelności. Biorąc powyższe pod uwagę na podstawie wieloletniej praktyki i obliczeń przyjmuje się, że najwyższa temperatura, do której ogrzewanie powietrza i paliwa gazowego jest korzystne, powinna być niższa o 250—300°C od temperatury spalin dopływających do regeneratora.

Temperatura zaś oziębionych gazów spalinowych opuszczających regeneratory jest zwykle wyższa o 200—400°C od temperatury dopływających do nich powietrza i paliwa gazowego.

Obliczając regeneratory metodą uproszczoną, przyjmuje się, że są znane

- | | | |
|---|------------|------|
| 1. temperatura początkowa powietrza | t'_{pom} | w °C |
| 2. temperatura początkowa paliwa gazowego | t'_p | w °C |
| 3. temperatura początkowa gazów spalinowych | t'_g | w °C |

oraz na podstawie powyższych rozważań ustala się:

- | | | |
|---|-------------|------|
| 1. średnią temperaturę, do której jest ogrzewane w regeneratorze powietrze | t''_{pom} | w °C |
| 2. średnią temperaturę, do której ogrzewa się w regeneratorze paliwo gazowe | t''_p | w °C |
| 3. średnią temperaturę gazów spalinowych opuszczających regeneratory powietrzny | t''_{1g} | w °C |
| 4. średnią temperaturę gazów spalinowych opuszczających regeneratory paliwowy | t''_{2g} | w °C |

Następnie, oznaczając przez:

V_{1g} — objętość gazów spalinowych przepływających przez regeneratory powietrzny w m³/sek,

V_{2g} — objętość gazów spalinowych przepływających przez regeneratory paliwowy w m³/sek,

c'_g — ciepło właściwe gazów spalinowych dopływających do regeneratory w kcal/m³·°C,

c''_{1g} — ciepło właściwe gazów spalinowych opuszczających regeneratory powietrzny w kcal/m³·°C,

c''_{2g} — ciepło właściwe gazów spalinowych opuszczających regeneratory paliwowy w kcal/m³·°C,

c'_{pom} i c''_{pom} — ciepła właściwe powietrza przed regeneratorem i za nim w kcal/m³·°C,

c'_p i c''_p — ciepła właściwe paliwa gazowego przed regeneratorem i za nim w kcal/m³·°C,

możemy obliczyć:

1. ilość ciepła Q_{1g} , które tracą gazy spalinowe w regeneratorze powietrzny

$$Q_{1g} = V_{1g} \cdot c'_g \cdot t'_g - V_{1g} \cdot c''_{1g} \cdot t''_{1g} = V_{1g} (c'_g \cdot t'_g - c''_{1g} \cdot t''_{1g}) \text{ kcal/sek} \quad [IV-10]$$

2. ilość ciepła Q_{2g} , którą tracą gazy spalinowe w regeneratorze paliwowy

$$Q_{2g} = V_{2g} \cdot c'_g \cdot t'_g - V_{2g} \cdot c''_{2g} \cdot t''_{2g} = V_{2g} (c'_g \cdot t'_g - c''_{2g} \cdot t''_{2g}) \text{ kcal/sek} \quad [IV-11]$$

¹⁾ Zamiast iloczynów $c'_g \cdot t'_g$, $c''_{1g} \cdot t''_{1g}$ itd. można przyjmować entalpie i'_g , i''_{1g} itd.

3. ilość ciepła Q_{pow} , które uzyskuje w regeneratorze powietrze

$$\begin{aligned} Q_{pow} &= V_{pow} \cdot c''_{pom} \cdot t''_{pom} - V_{pow} \cdot c'_{pom} \cdot t'_{pom} = \\ &= V_{pow} (c''_{pom} \cdot t''_{pom} - c'_{pom} \cdot t'_{pom}) \text{ kcal/sek} \end{aligned} \quad [IV-12]$$

4. ilość ciepła Q_p , które uzyskuje w regeneratorze paliwo gazowe

$$Q_p = V_p \cdot c''_p \cdot t''_p - V_p \cdot c'_p \cdot t'_p = V_p (c''_p \cdot t''_p - c'_p \cdot t'_p) \text{ kcal/sek} \quad [IV-13]$$

Biorąc pod uwagę, że ilości ciepła, które zyskują w regeneratorach powietrze i paliwo, są proporcjonalne do ilości ciepła, które tracą w odpowiednich regeneratorach gazy spalinowe, możemy napisać

$$\frac{Q_{1g}}{Q_{2g}} = \frac{Q_{pow}}{Q_p} \text{ albo } \frac{V_{1g} (c'_g \cdot t'_g - c''_{1g} \cdot t''_{1g})}{V_{2g} (c'_g \cdot t'_g - c''_{2g} \cdot t''_{2g})} = \frac{V_{pow} (c''_{pom} \cdot t''_{pom} - c'_{pom} \cdot t'_{pom})}{V_p (c''_p \cdot t''_p - c'_p \cdot t'_p)} \quad [IV-14]$$

Uwzględniając zaś, że ogólna objętość gazów spalinowych

$$V_g = V_{1g} + V_{2g}$$

z równań [IV-13] i [IV-14] można obliczyć objętość V_{1g} i V_{2g} , czyli ustalić w ten sposób podział gazów spalinowych pomiędzy regeneratory — powietrzny i paliwowy.

W obliczeniach powyższych nie wzięto pod uwagę zasysania przez regeneratory powietrza zewnętrznego wskutek nieuszczelności. Zasysanie jest dość znaczne podczas biegu gorącego, jeżeli regeneratory nie posiadają zewnętrznego płaszczka stalowego. Wtedy bowiem wskutek ssącego działania komina panuje w regeneratorach największe rozrzedzenie.

Zasysanie zewnętrznego powietrza można uwzględnić w powyższych obliczeniach, wprowadzając do wzoru [IV-10] współczynnik zasysania β , którego wartość wynosi od 0 dla regeneratorów osłoniętych ze wszystkich stron płaszczem stalowym do 0,3 dla długo pracujących małoszczelnych regeneratorów bez płaszczka. Uwzględniając współczynnik zasysania, wzór [IV-10] będzie miał postać następującą:

$$\begin{aligned} Q_{1g} &= V_{1g} \cdot c'_g \cdot t'_g - (1 - \beta) V_{1g} \cdot c''_{1g} \cdot t''_{1g} = \\ &= V_{1g} [c'_g \cdot t'_g - (1 - \beta) c''_{1g} \cdot t''_{1g}] \text{ kcal/sek} \end{aligned} \quad [IV-15]$$

Powierzchnia ogrzewalna regeneratorów. Obecnie stosowane metody obliczania regeneratorów są oparte na prawach wymiany ciepła. Do obliczania powierzchni ogrzewalnej wykorzystuje się wzory wyprowadzone dla wymienników o ustalonym ruchu ciepła, przy czym do wzoru na obliczenie powierzchni ogrzewalnej

$$F = \frac{Q_{sk}}{\epsilon \cdot \Theta_{sr}} \quad \text{m}^2 \quad [IV-16]$$

wprowadza się zamiast współczynnika ciepła k o wymiarze $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C}$, odniesionego do 1 godz, współczynnik wymiany ciepła ϵ od-

niesiony do okresu czasu obejmującego ogrzewanie i chłodzenie regeneratora. Wymiar współczynnika ε przedstawia się więc wobec tego w sposób następujący: kcal/m² · okres · °C.

Ilość ciepła Q_{ak} we wzorze [IV-16] jest ilością ciepła, które akumuluje wypełnienie regeneratora podczas biegu gorącego i następnie oddaje w czasie biegu zimnego. Jeżeli czas ogrzewania regeneratora równa się czasowi chłodzenia, to można przyjąć z dostateczną do celów technicznych dokładnością, że ilość ciepła, które akumuluje wypełnienie regeneratora powietrznego, równa się

$$Q_{ak\ pow} = Q_{pow} + \frac{Q_{1g} - Q_{pow}}{2} = \frac{Q_{pow} + Q_{1g}}{2} \text{ kcal/okres} \quad [\text{IV-17}]$$

a ilość ciepła, które akumuluje wypełnienie regeneratora paliwowego, wynosi

$$Q_{ak\ p} = Q_p + \frac{Q_{2g} - Q_p}{2} = \frac{Q_p + Q_{2g}}{2} \text{ kcal/okres} \quad [\text{IV-18}]$$

Należy przy tym pamiętać, że Q_{pow} , Q_p , Q_{1g} i Q_{2g} we wzorach [IV-17] i [IV-18] są to ilości ciepła w kcal/okres.

Średnią różnicę temperatur Θ_{sr} oblicza się jako średnią logarytmiczną ze wzoru [IV-4].

Współczynnik wymiany ciepła ε oblicza się ze wzoru

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_g \tau_g} + \frac{1}{\alpha_p \tau_p} + \frac{1}{\xi \cdot \eta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot c}} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{okres} \cdot \text{°C} \quad [\text{IV-19}]$$

wyprowadzonego na podstawie ogólnych praw wymiany ciepła przy uwzględnieniu przenikania ciepła od gazów spalinowych do cegły, akumulacji ciepła w cegle oraz przenikania ciepła od cegły do powietrza lub paliwa gazowego. We wzorze tym

α_g — cząstkowy współczynnik przenikania ciepła od gazów spalinowych do cegły w kcal/m² · godz · °C,

α_p — cząstkowy współczynnik przenikania ciepła od cegły do powietrza lub paliwa gazowego w kcal/m² · godz · °C,

τ_g — czas ogrzewania regeneratora w godz,

τ_p — czas oziębiania regeneratora w godz,

c — ciepło właściwe cegły w temperaturze średniej w danym przekroju regeneratora w kcal/kg · °C,

δ — grubość cegły w m,

γ — ciężar właściwy cegły w kG/m,

$\xi = \frac{t_{max}}{\Delta t_{sr}}$ — stosunek największej różnicy temperatur na powierzchni cegły do różnicy średniej,

η — współczynnik wykorzystania wypełnienia regeneratorów. Jest to stosunek ilości ciepła rzeczywiście zaakumulowanego przez wypełnienie

do ilości ciepła, która byłaby zaakumulowana przy nieskończonej wielkości przewodnictwie właściwym cegły.

Jak w przypadku rekuperatorów cząstkowy współczynnik przenikania ciepła α_g od gazów spalinowych do cegły oblicza się ze wzoru [IV-6], a od cegły do powietrza $\alpha_p = \alpha_k$, przy czym cząstkowy współczynnik przenikania ciepła przez konwekcję α_k oblicza się w wypełnieniu systemu Siemens (rys. IV-26 b) ze wzoru

$$\alpha_k = \frac{1,53 w_0^{0,5} \cdot T^{0,25}}{d^{0,33}} \quad \text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C} \quad [\text{IV-20}]$$

a dla wypełnienia systemu Cowpera (rys. IV-25) ze wzoru

$$\alpha_k = \frac{1,38 w_0^{0,5} \cdot T^{0,25}}{d^{0,33}} \quad \text{kcal/m}^2 \cdot \text{godz} \cdot ^\circ\text{C} \quad [\text{IV-21}]$$

gdzie: w_0 — prędkość w największym przejściu (w płaszczyźnie styku rzędów cegły), sprowadzona do warunków normalnych w Nm/sek,

d — zastępcza średnica w największym przejściu, równa czterem promieniom hydraulicznym w m,

T — temperatura bezwzględna w $^\circ\text{K}$.

Powierzchnia największego przejścia w płaszczyźnie styku dwóch rzędów wynosi na 1 m² powierzchni przekroju wypełnienia

$$\frac{a^2}{(a + \delta)^2} \quad [\text{IV-22}]$$

gdzie a — oznacza odległość pomiędzy cegłami w m.

Współczynnik wymiany ciepła przez promieniowanie α_{pr} oblicza się w regeneratorach na ogólnych zasadach omówionych w rozdz. III.

Wartości współczynników η i ξ wchodzących do wzoru [IV-19] można odczytać z wykresów przedstawionych na rys. IV-31.

Współczynnik wymiany ciepła ε oblicza się oddzielnie dla warunków panujących w górnej części regeneratora i oddzielnie dla dolnej jego części. Średnią wartość tego współczynnika oblicza się ze wzoru

$$\varepsilon = \frac{n \varepsilon_{gór} + \varepsilon_{dol}}{n + 1} \quad \text{kcal/m}^2 \cdot \text{okres} \cdot ^\circ\text{C}$$

Dla regeneratorów powietrznych przyjmuje się, że współczynnik wymiany ciepła zmienia się w nich prostoliniowo, wobec czego $n = 1$, natomiast dla regeneratorów paliwowych wartość n przyjmuje się równą od 1,25 do 1,75.

Opór wypełnienia regeneratorów. Strata ciśnienia podczas przepływu gazów przez wypełnienie regeneratorów zależy od rodzaju wypełnienia i jest spowodowana oporem tarcia oraz oporami miejscowymi.

Opór wskutek tarcia w wypełnieniu systemu Cowpera oblicza się wg ogólnych zasad rozpatrzonych w rozdz. II. Stratę zaś ciśnienia wskutek tarcia podczas przepływu gazów przez zwykłe wypełnienie Siemens'a (rys. IV-26a) oblicza się ze wzoru

$$h_t = 0,162 \cdot \gamma_0 \frac{w_0^2}{d^{0,25}} \cdot \frac{T}{B + b} l \quad \text{mm H}_2\text{O} \quad [\text{IV-23}]$$

gdzie: d — zastępcza średnica równa czterem promieniom hydraulicznym kanałów w m,

B — ciśnienie barometryczne w mm Hg,

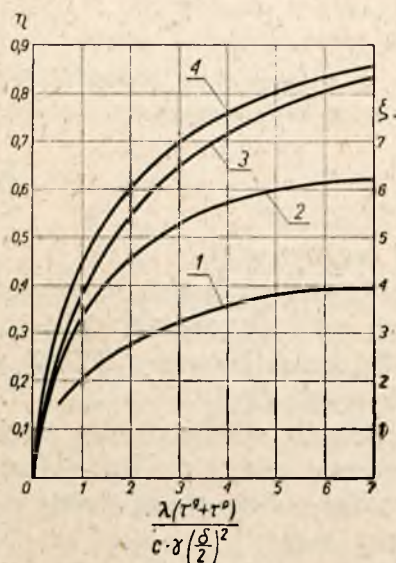
b — nadciśnienie w regeneratorze w mm Hg,

l — wysokość wypełnienia w m,

w_0 — prędkość gazów sprowadzonych do warunków normalnych w najwęższym przejściu (w płaszczyźnie styku warstw cegieł) w Nm/sek,

T — temperatura gazów w °K,

γ_0 — ciężar właściwy gazów w warunkach normalnych w kG/Nm³.



Rys. IV-31. Wartości współczynników η i ξ : 1, 2 — wartości ξ dla górnego i dolnego wypełnienia 3, 4 — wartości η dla dołu i góry wypełnienia

Strata ciśnienia wskutek tarcia podczas przepływu gazów przez wypełnienie Siemens'a w szachownicę (rys. IV-26 b) wynosi

$$h_t = 0,224 \gamma_0 \frac{w_0^2}{d^{0,25}} \cdot \frac{T}{B + b} l \quad \text{mm H}_2\text{O} \quad [\text{IV-24}]$$

Strata ciśnienia wskutek oporów miejscowych podczas przepływu gazów przez wypełnienie Siemens'a zależy od ilości warstw cegieł i równa się

$$h_m = 1,5 n \frac{w^2}{2g} \gamma \quad \text{mm H}_2\text{O} \quad [\text{IV-25}]$$

gdzie: n — liczba warstw cegieł w wypełnieniu,
 w — prędkość rzeczywista gazów w m/sek,
 γ — rzeczywisty ciężar właściwy gazów w kG/m^3 .

8. Kotły parowe do odzyskiwania ciepła gazów odlotowych

Ciepło zawarte w gazach odlotowych z pieców przemysłowych bywa odzyskiwane również w kotłach do wytwarzania pary. Zwykle parę tę odprowadza się, żeby ją wykorzystać do celów produkcyjnych poza pomieszczeniem piecowni, tylko wyjątkowo (np. w piecach gazowniczych systemu Glover-West) zużywa się ją użytecznie w samym piecu.

Dotychczasowa praktyka przemysłowa i obliczenia teoretyczne (np. W. P. Linczewskiego w pracy pt. Nagrewatielnyje pieczy) wykazują, że najekonomiczniej jest wykorzystywać ciepło odlotowych gazów spalinowych w samym piecu przez ogrzewanie powietrza i paliwa gazowego, podgrzewanie wprowadzanych do pieca surowców lub poduszanie wilgotnego paliwa. Wykorzystywanie tego ciepła do wytwarzania pary zużywanej poza piecem, do podgrzewania wody lub do innych celów nie związanych bezpośrednio z piecem jest znacznie mniej ekonomiczne.

Biorąc powyższe pod uwagę, należy dążyć do możliwie największego odzyskiwania i zwracania ciepła do komory roboczej pieca w postaci ciepła ogrzanych substratów procesu spalania (powietrza i gazu palnego).

Kotły parowe do odzyskiwania ciepła gazów odlotowych korzystnie jest ustawiać tylko w tych przypadkach, gdy temperatura gazów opuszczających regeneratory i rekuperatory jest jeszcze nadmiernie wysoka, aby można było odprowadzać je bez zbyt wielkich strat cieplnych do komina. Tego rodzaju kotły ustawia się również i wtedy, gdy nie można stosować regeneratorów i rekuperatorów ze względu na zawartość w gazach spalinowych zbyt dużej ilości popiołu lub krolepek roztopionego żużla.

Kotły parowe do odzyskiwania ciepła gazów odlotowych znalazły zastosowanie przede wszystkim w dużych piecach o działaniu ciągłym (np. w piecach martenowskich do topienia stali, w piecach płomiennych do przerobu rud miedzi, w piecach obrotowych do wypalania klinkieru metodą suchą lub w piecach gazowniczych systemu Glover-West).

Ustawianie kotłów parowych do odzyskiwania ciepła jest opłacalne wtedy, gdy temperatura gazów spalinowych nie jest niższa od 400°C . W kotłach parowych temperatura gazów zostaje obniżona do 180 — 200°C . Dalsze obniżanie temperatury w samym kotle zwykle się nie opłaca, ponieważ wymaga znacznego powiększenia powierzchni ogrzewalnej, ale jest możliwe w podgrzewaczu wody (w ekonomizerze). Wysokość temperatury gazów spalinowych doprowadzanych do kotła parowego

wpływa na jego wydajność. Im jest ona wyższa, tym wydajność kotła jest większa.

W sprzyjających warunkach w omawianych kotłach parowych można wykorzystać do 50% (a czasem i więcej) ciepła gazów odlotowych. Część uzyskanej energii (od 10 do 15%) zużywa się przy tym na obsługę samego kotła, głównie na wywołanie sztucznego ciągu.

Kotły parowe do odzyskiwania ciepła są zwykle kotłami niskoprężnymi ze względu na możliwość uzyskania w kotłach o niskim ciśnieniu większej różnicy temperatur między gazami spalinowymi i wodą niż w przypadku kotłów wysokoprężnych.

Instalacja kotłowa do odzyskiwania ciepła gazów odlotowych składa się zwykle z kotła parowego, podgrzewacza wody, przegrzewacza pary i pompy zasilającej. W niektórych przypadkach posiada ona dodatkowo palenisko.

Przegrzewacz pary wchodzi w skład instalacji kotłowej wtedy, gdy chodzi o wytwarzanie pary przegrzanej. Podgrzewacz wody instaluje się w celu możliwie większego, jeżeli jest to korzystne, obniżenia temperatury gazów odlotowych.

Dodatkowe palenisko zapewnia wytwarzanie pary, gdy instalacja piecowa nie jest czynna, natomiast musi być czynny kocioł parowy. Najczęściej jest to palenisko na paliwo gazowe, ponieważ jego obsługa i regulacja jest łatwiejsza niż palenisk na paliwo stałe. Podczas pracy pieca uruchamianie dodatkowego paleniska nie jest ekonomiczne, chyba że zmusza do tego konieczność pokrycia wzmożonego w pewnych okresach czasu zapotrzebowania na parę (podczas tzw. szczytów).

Gazy spalinowe po wyjściu z regeneratorów i rekuperatorów lub bezpośrednio z komory roboczej pieca są kierowane najpierw do przegrzewacza pary, a następnie do kotła i podgrzewacza wody. Płyną one w przeciwnym kierunku z parą i wodą pod wpływem ciągu naturalnego lub sztucznego. W celu umożliwienia wyłączenia z instalacji piecowej kotła parowego, przegrzewacza pary i podgrzewacza wody podczas ich czyszczenia i remontu instalacja powinna posiadać kanały obwodowe, którymi można odprowadzać do komina gazy spalinowe z pominięciem tych urządzeń.

Wymiana ciepła pomiędzy gazami spalinowymi i powierzchnią ogrzewalną kotłów do odzyskiwania ciepła jest oparta głównie na przenikaniu ciepła przez ściany kotła, ponieważ promieniowanie gazów ze względu na niską ich temperaturę jest małe. Mała różnica temperatur pomiędzy gazami spalinowymi i wodą w kotle oraz słaby udział promieniowania w wymianie ciepła zmuszają do stosowania kotłów parowych o bardzo silnie rozwiniętej powierzchni ogrzewalnej. W związku z tym do odzyskiwania ciepła znalazły zastosowanie w przemyśle kotły parowe

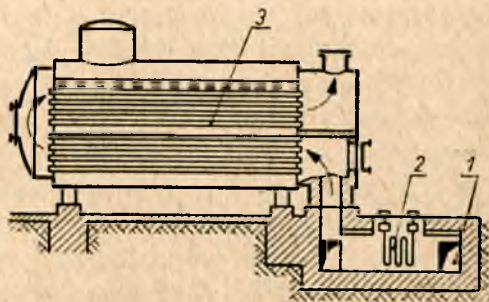
plamieniówkowe i wodnorurkowe, a w ostatnich czasach zaczęto również stosować kotły wodnorurkowe z cyrkulacją wymuszoną.

Kotły plamieniówkowe stosowane do odzyskiwania ciepła są to najczęściej kotły poziome bez obmurowania pokryte jednak izolacją w celu zmniejszenia strat ciepłych. Średnica ich wynosi od 2 do 2,5 m, długość zaś dochodzi do 6 m. Posiadają one 100 do 400 rurek plamieniowych o średnicy zewnętrznej od 60 do 70 mm.

Jeden z takich kotłów jest przedstawiony na rys. IV-32. Gorące gazy spalinowe doprowadzane kanałem 1 ogrzewają najpierw przegrzewacz 2, a następnie płyną przez dolny pęk rurek plamieniówkowych 3 do przodu kotła, gdzie zawracają i po przejściu przez górny pęk plamieniówek kierowane są do komina.

Rurki plamieniówki łączy się denkami sitowymi na stałe zwykle przez rozwalcowywanie albo w sposób rozłączny umożliwiający wyjmowanie

Rys. IV-32. Kocioł parowy plamieniówkowy: 1 — kanał doprowadzający spaliny, 2 — przegrzewacz, 3 — rurki plamieniówkowe



ich z kotła w celu oczyszczenia ich powierzchni zewnętrznej z kamienia kotłowego. Dla oczyszczania powierzchni wewnętrznej rurek z sadzy kocioł posiada odpowiednie otwory zamykane drzwiczkami.

Kotły ogniorurkowe stawiają dość duże opory gazom spalinowym przepływającym przez nie z prędkością od 6 do 15 m/sek. Dla pokonania tych oporów, które wahają się w zależności od konstrukcji i wielkości kotła w granicach od 30 do 80 mm H₂O, stosuje się ciąg sztuczny. Zużycie pracy wynosi przy tym od 6 do 12 kWh na 1 t pary.

Kotły wodnorurkowe do odzyskiwania ciepła gazów odlotowych buduje się jako kotły o rurkach słabo pochylonych, albo jako kotły stromorurkowe. Średnica zewnętrzna rurek wynosi od 56 do 102 mm. Kotły te posiadają obmurowanie. Stosuje się je głównie, gdy ciśnienie wytwarzanej pary przekracza 10—12 atmosfer.

Jeżeli temperatura gazów spalinowych opuszczających regeneratory i rekuperatory nie jest tak wysoka, żeby się opłacało ustawienie kotła parowego, wykorzystuje się ciepło zawarte w tych gazach do podgrzewania wody w odpowiednich wymiennikach ciepła. Jako podgrzewacze wody stosuje się aparaty z rur gładkich lub żebrowanych.

W wielu przypadkach ciepło zawarte w gazach odlotowych z rekupe-
ratorów i regeneratorów wykorzystuje się do suszenia paliwa (węgla
brunatnego, torfu lub drewna). Przy opalaniu wilgotnym paliwem trudno
jest osiągnąć w piecach dostatecznie wysoką temperaturę bez nadmiernie
dużego zużycia paliwa. Podsuszanie paliwa kosztem ciepła zawartego
w gazach odlotowych umożliwia osiągnięcie wyższych temperatur w pie-
cu, powiększa jego sprawność i zmniejsza zużycie paliwa.

PIECE SZYBOWE**1. Wiadomości ogólne o piecach szybowych**

Piece szybowe są stosowane w różnych gałęziach przemysłu, a mianowicie: w przemyśle ceramicznym do wypalania gliny, magnezytu i dolomitu, w przemyśle wapienniczym do wypalania wapna, w przemyśle cementowym do wypalania klinkieru, a w przemyśle metalurgicznym do wytapiania surówki z rud żelaznych (wielki piec), do topienia żeliwa (żeliwiak) oraz do prażenia tlenków i siarczków metali kolorowych itd.

Chociaż piece te są stosowane do różnych celów już od kilku wieków, nie wszystkie jednak zachodzące w nich procesy są dotychczas dobrze poznane i całkowicie wyjaśnione. Tłumaczy się to dość trudnym dostępem do wnętrza pieców szybowych w celu prowadzenia bezpośrednich obserwacji oraz pomiarów i bardzo skomplikowanym charakterem procesów chemicznych i fizycznych, przebiegających jednocześnie w szybie. Do najważniejszych z nich można zaliczyć: 1) reakcje chemiczne i przemiany fizyczne, zachodzące w przerabianych w piecu materiałach, 2) spalanie paliwa, 3) ruch gazów, 4) ruch materiałów i produktów i 5) wymianę ciepła pomiędzy gazami i wsadem.

Brak pewnych, opartych na teoretycznych podstawach wiadomości o zjawiskach przebiegających w piecach szybowych zmusza do szerokiego wykorzystania do ich projektowania, budowy i prowadzenia nagromadzonych dotychczas w różnych gałęziach przemysłu danych praktycznych.

Przerabiane w piecach surowce są doprowadzane w górnej części szybów w sposób ciągły lub w regularnych, możliwie krótkich odstępach czasu, a produkty są odprowadzane również w sposób ciągły w dolnej ich części. Ruch materiałów w piecu zachodzi pod działaniem siły ciężkości. Podczas ruchu w dół materiały są poddawane w szybie termicznej obróbce, przy czym najwyższa potrzebna do tego temperatura utrzymuje się wewnątrz szybu mniej więcej na $\frac{1}{3}$ jego wysokości, licząc od dołu.

Ruch gazów wewnątrz pieca odbywa się z dołu do góry, a więc w przeciwnym kierunku do przerabianych materiałów. Powietrze, wchodząc do szybu

od dołu, chłodzi wypalony materiał i dostaje się w strefę spalania, mając dość wysoką temperaturę. Gazy spalinowe, poruszając się do góry, ogrzewają doprowadzane surowce i opuszczają piec mając już znacznie niższą temperaturę.

W ten sposób w piecach szybowych, pracujących zgodnie z powyższym schematem, czyli w piecach do wypalania wapna, cementu i materiałów ceramicznych można rozróżnić trzy strefy: w górze pieca — strefę podgrzewania, w środku pieca — strefę wypalania i na dole pieca — strefę studzenia.

Piece szybowe pracują prawidłowo, bez braków i z małym zużyciem paliwa tylko przy równomiernym ich zasilaniu i wyładowywaniu, równomiernym dopływie paliwa i powietrza oraz przy starannej i umiejętnej obsłudze.

Do ogrzewania pieców szybowych stosuje się paliwo stałe i gazowe. Piece na paliwo stałe można podzielić na piece przesypowe, w których paliwo, doprowadzane do pieca warstwami razem lub na przemian z surowcami przeznaczonymi do wypalania, spala się wewnątrz szybu, i na piece z paleniskami zewnętrznymi, w których paliwo spala się poza szybem.

Paliwo stałe, stosowane do pieców przesypowych, powinno być krótkopłomienne o małej zawartości popiołu. Z tego powodu najodpowiedniejszy jest koks, który w krajach bogatych w antracyt (np. w Anglii i w ZSRR) jest nim zastępowany. W przypadku spalania w powyższych piecach paliw długopłomiennych lotne węglowodory wydzielają się z paliwa już w górnych warstwach szybu, gdzie odbywa się stopniowe podgrzewanie wsadu. Ponieważ w strefie podgrzewania jest zwykle mało wolnego tlenu i panuje stosunkowo niska temperatura, więc wydzielające się węglowodory w znacznej swej części nie ulegają spaleniowi i — opuszczając piec z gazami odlotowymi — są przyczyną powstawania nadmiernie dużych strat ciepłych.

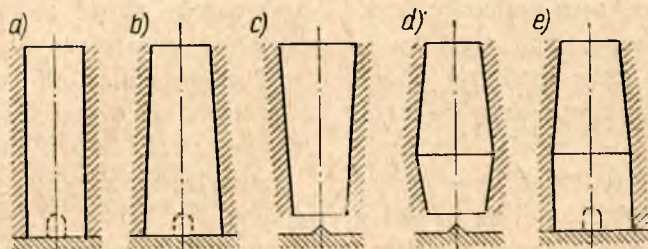
Popiół zawarty w paliwie zanieczyszcza wypalane w piecu przesypowym materiały, a poza tym, jeżeli jest łatwo topliwy, działa chemicznie na obmurowanie szybu, przyczyniając się do szybszego zniszczenia obmurza i powstawania w szybie zwisów i sklepień.

W piecach szybowych pracujących na paliwie gazowym (np. na gazie generatorowym) paliwo doprowadza się bezpośrednio do szybu w najniższym miejscu strefy wypalania. Powietrze natomiast dopływa z dołu poprzez strefę chłodzenia, gdzie podnosi swoją temperaturę.

Równomierne rozmieszczenie w przekroju pieca paliwa gazowego zależy w znacznym stopniu od kształtu otworów, którymi doprowadza się je do szybu. W piecach dawnej konstrukcji, w których otwory te mają kształt kwadratów, temperatura w środku pieca jest zwykle niższa niż bliżej ściany. W piecach nowszej konstrukcji otworom powyższym nadaje się kształt wąskich, lecz wysokich szczelin, co przyczynia się do

zwiększenia głębokości przenikania płomienia w głąb materiału i w związku z tym do równomierniejszego rozmieszczenia temperatury w przekroju poprzecznym pieca.

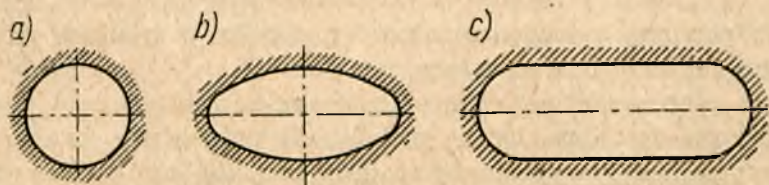
Paliwo ciekłe jest stosowane w piecach szybowych bardzo rzadko, głównie w piecach do wypalania magnezytu. Rozpyła się je po uprzednim podgrzaniu za pomocą sprężonego do 400—500 mm H₂O powietrza i spala w specjalnych komorach paleniskowych znajdujących się w ścia-



Rys. V-1. Kształt pieców szybowych: a) walcowy, b) i c) stożkowy, d) dwustożkowy i e) stożkowo-walcowy

nach szybu. Daje to możliwość wypalania magnezytu w temperaturze 1550—1600°C.

Kształt pieców szybowych bywa walcowy (rys. V-1 a), stożkowy (rys. V-1 b, c), dwustożkowy (rys. V-1 d) i stożkowo-walcowy, przekrój



Rys. V-2. Przekroje poprzeczne pieców szybowych: a) okrągły, b) owalny, c) wydłużony

zaś poprzeczny-okrągły (rys. V-2 a), owalny (rys. V-2 b) i wydłużony z zaokrąglonymi końcami (rys. V-2 c).

Kształt walcowy (rys. V-1 a), dość często spotykany w piecach szybowych do prażenia tlenków i siarczków metali kolorowych, posiadają również niektóre piece do wypalania wapna i materiałów ceramicznych. Bardziej racjonalny jest jednak szyb w postaci stożka ściętego rozszerzającego się nieco ku dołowi (rys. V-1b). Ułatwia on opuszczanie się w dół wypalanego materiału i utrudnia powstawanie wewnątrz szybu sklepień i zwisów. Wewnętrzne obmurowanie takiego szybu dłużej utrzymuje się w należyтым stanie.

Kształt stożka ściętego, zwężającego się ku dołowi (rys. V-1 c), niektórych pieców do wytapiania metali kolorowych z ich tlenków i siarczków

ków, nie nadaje się do pieców wapiennych i ceramicznych, ponieważ utrudnia opuszczanie się wypalanych materiałów i ułatwia zatrzymywanie się ich w szybie wskutek powstawania zwisów i sklepień.

Szyb w postaci dwóch ściętych stożków stykających się ze sobą szerszymi podstawami (rys. V-1 d) spotyka się w piecach przesypowych dość często. Wysokość tych stożków dobiera się tak, aby strefy podgrzewania i wypalania mieściły się w górnym stożku, a strefa studzenia — w dolnym stożku.

Kształt stożkowo-walcowy (rys. V-1 e) należy uznać za najodpowiedniejszy do wypalania wapnia i materiałów ceramicznych w piecach szybowych z zewnętrznymi półgazowymi paleniskami. W części stożkowej pieców tych mieszczą się strefy podgrzewania i wypalania, a w części cylindrycznej — strefa studzenia. Otwory, przez które dopływają do pieca gazy z palenisk zewnętrznych, znajdują się zwykle w tych piecach na linii łączenia się części górnej z dolną.

Przekrój poprzeczny pieców szybowych najczęściej jest okrągły (rys. 2 a), ponieważ w piecach o przekroju kołowym dogodniej jest rozmieszczać wsad równomiernie w całym przekroju szybu niż w piecach o innych przekrojach, a poza tym straty ciepłe powstałe przez promieniowanie i konwekcję są w nich mniejsze. Wielkość przekroju poprzecznego przesypowych pieców szybowych w zasadzie może być, ze względu na dość równomierne spalanie paliwa w całym przekroju, dowolnie duża. Ze względu jednak na zapewnienie łatwiejszego załadunku i równomiernego z całego przekroju wyładunku pieca średnica wewnętrzna szybu nie powinna być większa niż 4,5 m i tylko w wielkich piecach do wytapiania surówki bywa większa.

Średnica pieców szybowych z paleniskami zewnętrznymi i pieców na paliwo gazowe jest ograniczona głębokością przenikania gazów w głąb szybu wypełnionego wypalaniem materiałem. Wielkość ta nie przekracza zwykle 1,1 m, wobec czego średnica przekroju wewnętrznego szybu w tego rodzaju piecach nie powinna być większa od 2,2 m. Piece na paliwo gazowe lub z paleniskami zewnętrznymi, których średnica wewnętrzna jest większa od 2,2 m, pracują niezadowolająco, ponieważ płomień nie dochodzi w tym przypadku do środka pieca, gdzie wskutek tego powstaje słup źle wypalonego materiału, tym grubszy, im średnica pieca jest większa.

Aby powiększyć wydajność pieców na paliwo gazowe i z paleniskami zewnętrznymi, buduje się je o przekroju owalnym (rys. V-2 b) lub wydłużonym z zaokrąglonymi końcami. Odległość pomiędzy dłuższymi bokami takich pieców nie przekracza zwykle 2,2 m, aby rozmieszczone w nich otwory (palniki), doprowadzające do szybu paliwo gazowe lub gorące gazy, zabezpieczyły równomierne wypalanie materiału w piecu.

Materiały znajdujące się w szybie pieców szybowych stawiają duży opór przepływającym przez piec gazom. Dla pokonania tego oporu ciąg

kominowy zwykle nie wystarcza i dlatego są stosowane wentylatory. W piecach przesypowych ruch gazów odbywa się pod działaniem wentylatora tłoczącego, który tłoczy do pieca powietrze od dołu. W całym piecu panuje wobec tego ciśnienie wyższe od ciśnienia atmosferycznego, co powoduje wydostawanie się na zewnątrz spalin i powietrza przez wszelkiego rodzaju otwory i nieszczelności. Dla zapobieżenia temu należy dbać o dobre uszczelnienie pieca, a szczególnie dolnej jego części.

W piecach szybowych z paleniskami zewnętrznymi ruch powietrza i gazów wywołuje wentylator wyciągowy, który — wysysając z pieca gazy spalinowe — wytwarza w nim podciśnienie, wskutek czego powietrze dostaje się do szybu nie tylko z dołu przez strefę chłodzenia, lecz również i przez wszelkie otwory i nieszczelności pieca. Wpływa to na obniżenie temperatury w piecu wskutek przedostawania się do niego nadmiernej ilości zimnego powietrza oraz na rozcieńczenie gazów spalinowych i powiększenia strat ciepłych.

Najlepiej pracują piece szybowe z paleniskami zewnętrznymi przy dwóch wentylatorach. Jeden z nich — tłoczący — doprowadza powietrze od dołu do strefy studzenia, a drugi — ssący — odprowadza gazy spalinowe z górnej części strefy podgrzewania. W tym przypadku dolna część pieca, czyli strefa studzenia, znajduje się pod ciśnieniem wyższym od ciśnienia atmosferycznego, górna zaś część pieca, obejmująca strefy wypalania i podgrzewania — pod ciśnieniem mniejszym od ciśnienia zewnętrznego. Ciśnienie w szybie na wysokości otworów, przez które dostają się do pieca z palenisk zewnętrznych gorące gazy spalinowe lub półgaz, powinno być równe zeru lub nieco niższe od ciśnienia atmosferycznego, ponieważ w przeciwnym przypadku powietrze przedostawałoby się do palenisk. W związku z tym ciśnienie, które wytwarza wentylator tłoczący, wynosi średnio od 200 do 600 mm H₂O i dochodzi w niektórych piecach do 1500 mm H₂O, a próżnia (podciśnienie) wytwarzana przez wentylator wyciągowy waha się w granicach od 30 do 150 mm H₂O.

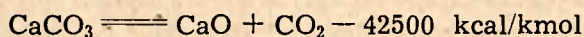
Ażeby zabezpieczyć piece szybowe od szkodliwego zasysania przez nieszczelności powietrza zewnętrznego i wydostawania się na zewnątrz gorących gazów, otacza się je często płaszczem stalowym.

Współczynnik nadmiaru powietrza w piecach szybowych do wypalania wapna i materiałów ceramicznych wynosi w piecach przesypowych od 1,1 do 1,25, w piecach z półgazowymi paleniskami zewnętrznymi — od 1,4 do 1,6, w piecach opalanych paliwem gazowym — od 1,2 do 1,6, w piecach zaś metalurgicznych wielkość jego zależy od tego, czy wewnątrz szybu należy utrzymywać atmosferę redukującą, czy utleniającą.

Dla szczegółowego zapoznania się z budową i działaniem pieców szybowych rozpatrzmy piece do wypalania wapna.

2. Piece szybowe do wypalania wapna

Wapno palone uzyskuje się, jak wiadomo, z rozkładu węglanu wapniowego na tlenek wapniowy i dwutlenek węgla. Rozkład powyższy przebiega zgodnie z reakcją



w temp. 898°C pod ciśnieniem cząstkowym CO_2 , równym 1 ata (wg Johnstone'a). Reakcja powyższa jest odwracalna i silnie endotermiczna. Dla prawidłowego jej przebiegu należy doprowadzać ciepło i energicznie usuwać dwutlenek węgla.

Węglan wapniowy nie występuje w przyrodzie w stanie czystym, lecz stanowi główną składową część kamieni wapiennych, marmuru i kredy. Kamienie wapienne i marmur, stosowane jako surowiec w piecach wapiennych, powinny zawierać wg norm technicznych, przyjętych w cukrownictwie i odniesionych do suchego kamienia wapiennego, nie mniej niż 95% węglanu wapniowego oraz nie więcej niż 1,5% węglanu magnezowego, najwyżej 1,5% tlenków glinu i żelaza, nie więcej niż 0,2% kwasnego siarczanu wapniowego, do 0,25% tlenków sodu i potasu oraz nie więcej niż 2,5% dwutlenku krzemu. Wilgotność kamieni wapiennych jest zwykle mała i rzadko kiedy dochodzi do 5%.

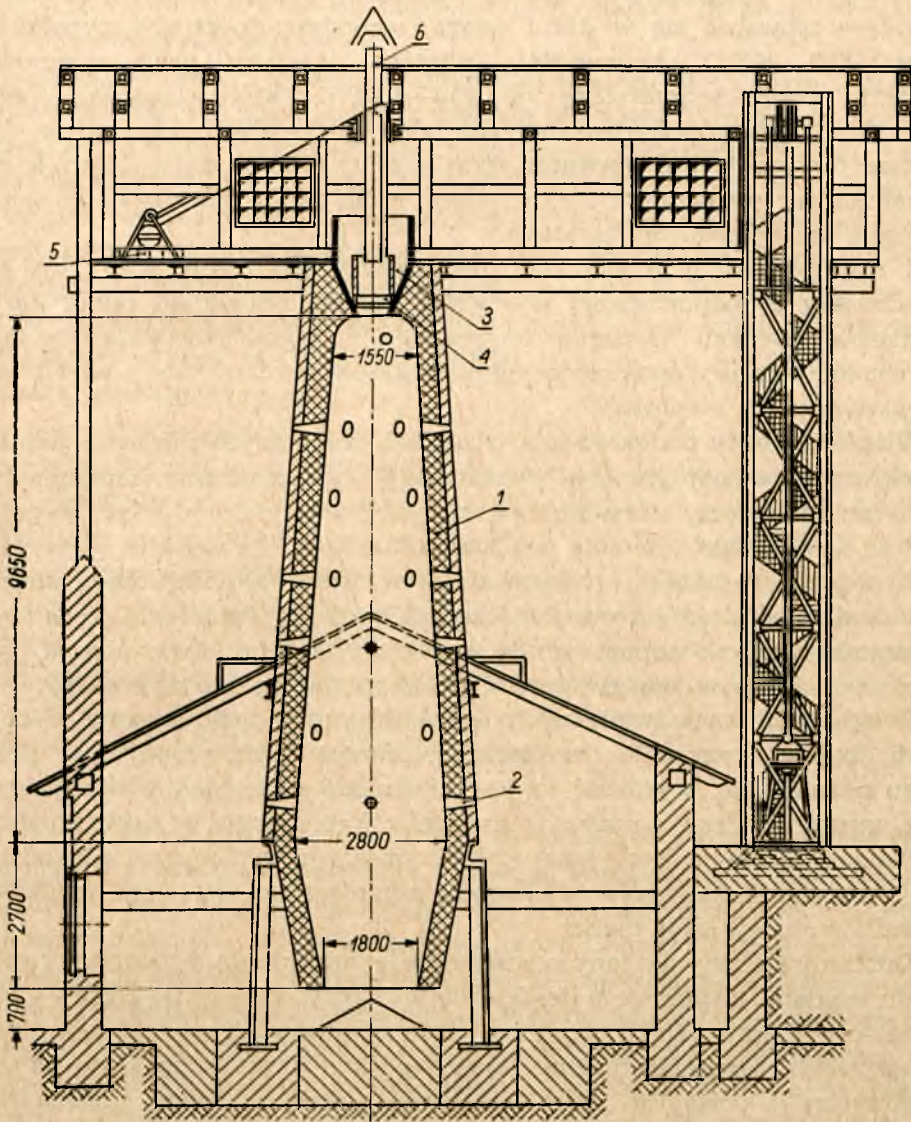
Kamień wapienny wprowadzany do pieca wapiennego powinien być w kawałkach możliwie jednakowej wielkości, o ciężarze od 2 do 4 kg. Duże kawałki trudniej się wypalają i muszą przebywać w piecu dłużej, drobne zaś stawiają zbyt wielki opór gazom przepływającym przez szyb.

Produkty rozkładu kamieni wapiennych, zarówno tlenek wapniowy, jak i dwutlenek węgla, są stosowane jako surowce w niektórych gałęziach przemysłu chemicznego. Piece wapienne znajdują się w cukrowniach, fabrykach sody (pracujących metodą Solvaya), saletry wapniowej, karbidu i innych. Służą one również do wypalania wapna na zaprawy murarskie, które przygotowuje się mieszając piasek z wodorotlenkiem wapniowym $\text{Ca}(\text{OH})_2$, czyli tzw. wapnem gaszonym.

Obsługa pieców wapiennych może być ręczna i mechaniczna. Obsługę ręczną stosuje się obecnie tylko w piecach mniejszych i starszych. W nowoczesnych piecach o większych wymiarach wszystkie czynności związane z ich obsługą, wymagającą ciężkiej i szkodliwej dla zdrowia pracy, a przede wszystkim załadunek i wyładunek pieca są zmechanizowane.

Piec szybowy o obsłudze ręcznej, tzw. piec belgijski, przedstawiony jest na rys. V-3. Jest to piec przesypowy. Jego obmurowanie składa się zwykle z dwóch warstw, z których wewnętrzną wykonuje się z cegły szamotowej 1, a zewnętrzną — z cegły zwykłej. Czasami cegłę zwykłą zastępuje się, aby obniżyć ciężar obmurowania, cieńszą niż cegła warstwą tłuczonego szamotu, jak pokazano na rys. V-3.

W ścianach pieca (rys. V-3) znajdują się na różnych wysokościach otwory 2 pełniące rolę wzierników, przez które obserwuje się procesy spalania paliwa i wypalania wapna. Umożliwiają one poza tym rozbijanie za pomocą stalowych łomów powstałych w szybie zwisów i sklepień



Rys. V-3. Piec belgijski

w przypadku spiekania się wypalonego materiału. Otwory te są szczelnie zamykane żeliwnymi pokrywami. Kamień wapienny i paliwo są podnoszone na górny pomost za pomocą windy lub innego podnośnika i ładowane do pieca warstwami w regularnych odstępach czasu po-

przez lej 3. Dolny otwór tego leja jest zamknięty dzwonem 4. W celu wprowadzenia do pieca kolejnej porcji wsadu doprowadzonego poprzednio do leja podnosi się dzwon 4 za pomocą wciągarki 5 i wsad, spadając do szybu, dostaje się do strefy podgrzewania.

W strefie podgrzewania kamień wapienny ogrzewa się stopniowo w miarę zsuwania się w dół i osiąga, wchodząc do strefy wypalania, temp. 850—900°C. Jednocześnie płynące do góry gazy spalinowe obniżają swoją temperaturę od 950—1000°C (którą posiadają przy wejściu do strefy podgrzewania) do temp. 150—300°C. Oczywiście, im wyższa jest strefa podgrzewania, tym gazy spalinowe dłużej stykają się z kamieniem wapiennym i tym więcej przekazują mu ciepła, a same ostygają do niższej temperatury.

Z tego powodu przy obsłudze pieca należy dbać o to, ażeby był on załadowany do odpowiedniej wysokości, zwykle prawie do samej góry. Obniżenie poziomu kamienia wapiennego w piecu powoduje bowiem wzrost temperatury opuszczających piec gazów spalinowych, a więc i powiększenie strat ciepłych.

Wysokość strefy podgrzewania w piecach wapiennych nie może jednak przekroczyć pewnej granicy, wyznaczonej wytrzymałością kamienia na zgniatanie i oporem, który muszą pokonywać wentylatory. Jeżeli wytrzymałość wypalanego kamienia jest niska, to nie należy wypalać go w piecach o dużej wysokości, ponieważ dolne warstwy materiału będą ulegać zgniataniu pod ciężarem warstw leżących wyżej. Wypełnienie pieca szymbowego kamieniem wapiennym do wysokiego poziomu stwarza poza tym duży opór, który muszą pokonywać przepływające przez szyb gazy.

Zwykle w piecach wapiennych wysokość strefy podgrzewania wynosi od 6 do 8 m, przy czym w piecach starszego typu, pracujących przy ciągu naturalnym, wysokość ta jest niższa niż w piecach posiadających ciąg sztuczny. Przy wypalaniu kamienia wapiennego w drobniejszych kawałkach strefa podgrzewania (jak również i cały piec) jest niższa niż przy wypalaniu kawałków większych, ponieważ ze wzrostem wielkości kawałków maleje opór pieca.

Kamień wapienny ogrzany w strefie podgrzewania do temperatury rozkładu węglanu wapniowego dostaje się do strefy wypalania, gdzie — pobierając w dalszym ciągu ciepło od gazów spalinowych — wydziela dwutlenek węgla. Rozkład poszczególnych jego kawałków zaczyna się na ich powierzchni i postępuje stopniowo coraz głębiej w miarę przenikania ciepła do środka. Wytwarzający się na powierzchni kawałków kamienia wapiennego tlenek wapnia styka się w dalszym ciągu z gorącymi gazami spalinowymi. Temperatura ich w strefie wypalania nie powinna przewyższać więcej niż o 100—200°C temperaturę rozkładu węglanu wapniowego, czyli nie powinna przekraczać 1100°C. W przeciwnym razie może nastąpić przegrzewanie wapna i spiekanie z domieszkami, co prowadzi do obniżenia jego zdolności do lasowania.

Wypalone wapno dostaje się ze strefy wypalania, której wysokość wynosi zwykle od 3 do 4 m (przy większych kawałkach kamienia wapiennego jest wyższa niż przy mniejszych), do strefy studzenia o wysokości od 2 do 3 m. W strefie tej temperatura wapna obniża się od ok. 900°C, którą posiadało ono w dolnej części strefy wypalania, do temp. 50—100°C, z którą jest usuwane z pieca.

Jak z powyższego wynika, w omawianym piecu wapiennym (rys. V-3), podobnie jak w wielu innych piecach szybowych wskutek przeciwprądowego ruchu wewnątrz pieca fazy stałej i gazowej zachodzi na dole bezpośrednia wymiana ciepła pomiędzy wypalonym, silnie rozgrzanym wapnem i zimnym powietrzem, a na górze — pomiędzy gorącymi gazami spalinowymi i kamieniem wapiennym oraz koksem. Wymiana powyższa nie tylko umożliwia odzyskanie (regenerację) części ciepła zawartego w wypalonym wapnie i w gazach odlotowych, ale również przygotowuje stopniowo kamień wapienny do reakcji rozkładu, co przyspiesza proces jego wypalania w piecu.

Gazy opuszczające piec zawierają normalnie od 30 do 32% dwutlenku węgla pochodzącego ze spalania paliwa i z rozkładu węglanu wapniowego. Dwutlenek węgla jest potrzebny do celów technologicznych w niektórych zakładach przemysłowych, np. w fabrykach sody i w cukrowniach. Z tego powodu gazy odprowadzane z pieców wapiennych tych zakładów są przesyłane za pomocą pompy gazowej lub wentylatora (które nie są pokazane na rys. V-3) do odpowiednich oddziałów produkcyjnych. Krótki komin 6, widoczny na rysunku, służy do odprowadzenia gazów do atmosfery w czasie rozpalania pieca albo wówczas, gdy odbiór gazów do celów produkcyjnych nie jest dostateczny lub jest przerwany. Podczas normalnej pracy pieca komin 6 jest zamknięty.

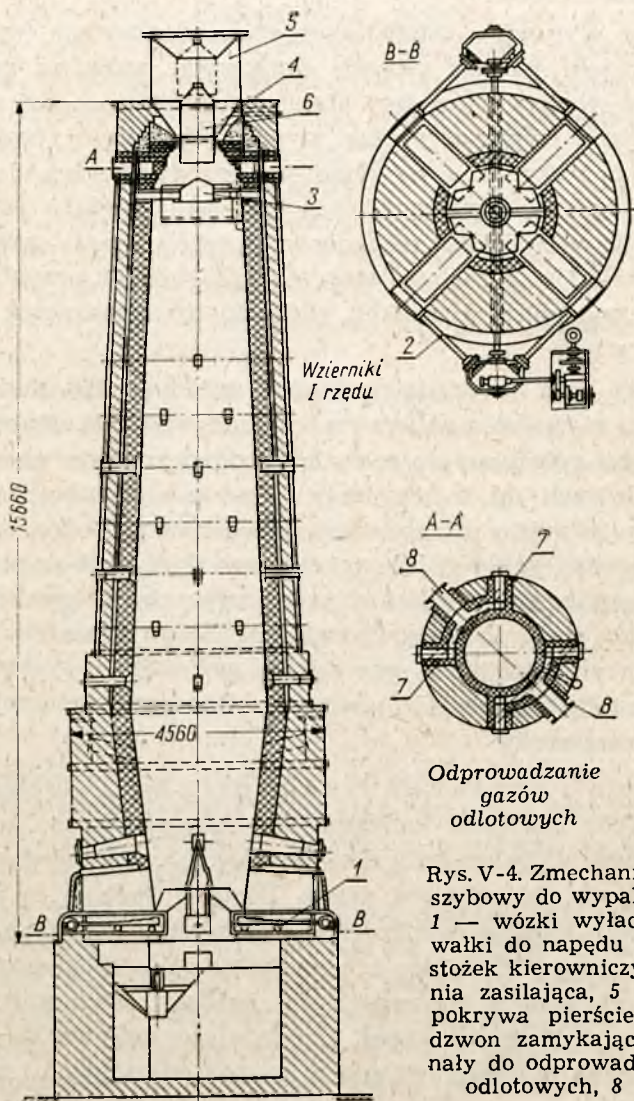
Pieca szybowe o obsłudze mechanicznej. Obsługa ręczna pieców szybowych, ładowanie kamienia wapiennego i koksu, a szczególnie wyładowywanie wypalonego wapna, wymaga uciążliwej dla robotników i szkodliwej dla ich zdrowia pracy. Dlatego obecnie w piecach wapiennych większej i średniej wielkości są powszechnie stosowane urządzenia do mechanicznego załadunku i wyładunku pieca. Dodatkową zaletą mechanizacji powyższych czynności jest bardziej równomierna niż przy wyładunku ręcznym praca pieca, co dodatnio wpływa na jakość wapna, wzrost stężenia dwutlenku węgla w gazach odlotowych i zmniejszenie zużycia paliwa.

Jednym z lepszych tego rodzaju przesypowych pieców wapiennych jest piec konstrukcji radzieckiej, przedstawiony na rys. V-4.

Zasilanie tego pieca odbywa się przez skrzynię zasilającą 4 zamykaną żeliwnym dźwonem 6. W celu zmniejszenia do minimum ilości powietrza zasysanego do pieca podczas zasilania skrzynia 4 posiada u góry stożkową

pokrywą pierścieniową 5. Otwór w środku tej pokrywy zamyka w czasie zasilania denko podniesione do góry dzwonu 6.

Aby ułatwić układanie się kamienia wapiennego i paliwa podczas zasilania równomierną warstwą w całym przekroju pieca, w górnej jego części (rys. V-4) znajduje się nieruchomy stożek kierowniczy 3.

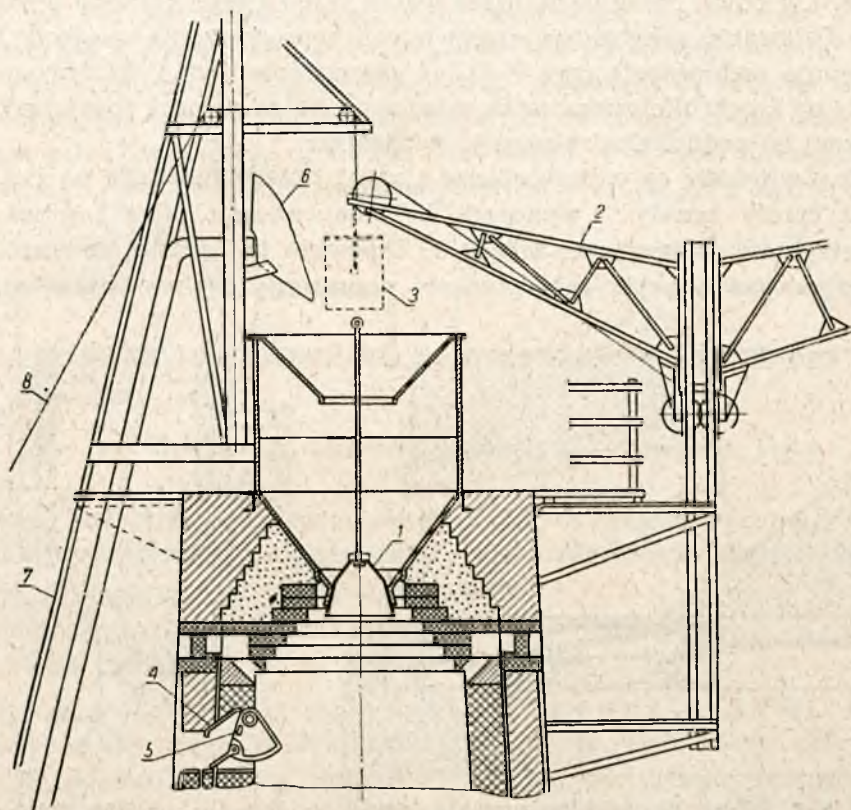


Rys. V-4. Zmechanizowany piec szybowy do wypalania wapna: 1 — wózki wyladowcze, 2 — wałki do napędu wózków, 3 — stożek kierowniczy, 4 — skrzynia zasilająca, 5 — stożkowa pokrywa pierścieniowa, 6 — dzwon zamykający, 7 — kanały do odprowadzania gazów odlotowych, 8 — króćce

Na rys. V-5 przedstawiona jest w większej skali górna część pieca wapiennego takiej samej konstrukcji jak piec pokazany na rys. V-4, w którym zasilanie rozwiązane jest inaczej. Dzwon 1 zamykający skrzynię zasilającą (rys. V-5) ma kształt stożka i w czasie zasilania pieca opuszcza się w dół, przez co spełnia również rolę stożka kierowniczego. Żuraw

obrotowy 2, który podczas normalnej pracy nie jest czynny, służy do pierwotnego załadunku pieca przed jego uruchomieniem. Odbywa się to po usunięciu bębna 1 przez opuszczenie wypełnionej kamieniem wapiennym lub paliwem kadzi 3.

Dla ustalenia wysokości poziomu kamienia wapiennego w piecu, który normalnie powinien znajdować się o 0,7—0,8 m poniżej kanałów do



Rys. V-5. Górna część zmechanizowanego pieca szybowego do wypalania wapna

odprowadzania z szybu gazów odlotowych, nowoczesne piece szybowe posiadają dwa wskaźniki poziomu: jeden z nich wskazuje najwyższy, a drugi — najniższy poziom, do którego należy ładować piec.

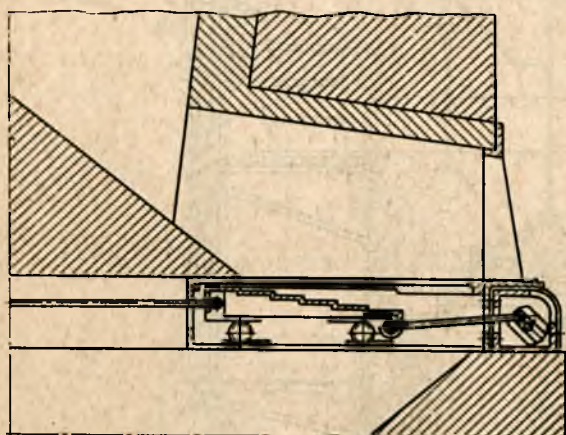
Wskaźniki poziomu (rys. V-5) składają się ze skrzynki 4 posiadającej obracający się na osi sektor 5. Gdy na wewnętrzną jego powierzchnię ciśnie kamień wapienny, usuwa się on do skrzyni i uruchamia sygnalizację świetlną lub dźwiękową. W analogiczny sposób jest urządzony dolny wskaźnik, który uruchamia odpowiednią sygnalizację, gdy nie ma nacisku na sektor.

Piec posiada podnośnik skipowy (rys. V-5). Po szynach tego podnośnika, umieszczonych wewnątrz pochyłej konstrukcji 7, wciągarka elektryczna

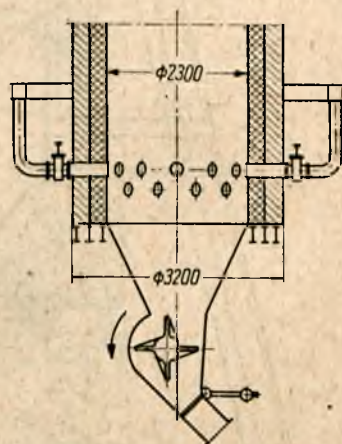
podnosi za pomocą liny 8 wózek 6 wypełniony odpowiednią porcją kamienia wapiennego i węgla. Wózek pokazany jest na rys. V-5 w swym górnym położeniu, w chwili gdy porcja kamienia wapiennego i węgla wysypuje się z niego do skrzyni zasilającej.

Sterowanie podnośnikiem i załadunkiem pieca odbywa się na dole. Silnik wciągarki wyłącza się automatycznie za pomocą wyłącznika krańcowego w chwili osiągnięcia przez wózek skipu swego górnego położenia. Po załadowaniu skrzyni zasilającej w celu wprowadzenia wsadu do pieca następuje podniesienie (rys. V-4) lub opuszczenie (rys. V-5) dzwonu (zależnie od konstrukcji urządzenia załadowczego) za pomocą specjalnej, niezależnej od podnośnika skipowego wciągarki.

Gazy odlotowe są odprowadzane z pieca przedstawionego na rys. V-4 przez cztery kanały 7 wykonane w obmurowaniu pieca i przez dwa symetrycznie umieszczone króćce 8. Zapewnia to bardziej równomierny przepływ gazów przez cały przekrój poprzeczny szybu. Odprowadzanie



Rys. V-6. Wózek do wyładowywania z pieców szybowych wypalonych materiałów



Rys. V-7. Dolna część pieca szybowego systemu Isserlisa

bowiem gazów tylko przez jeden kanał w górze pieca powoduje jednostronny ich przepływ przez szyb, co wpływa ujemnie na pracę pieca.

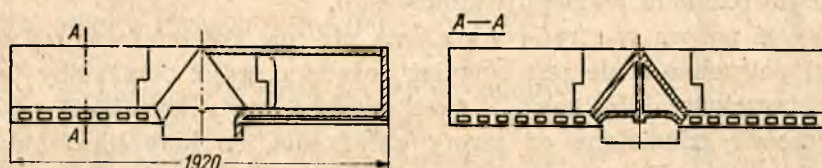
Usuwanie wypalonego wapna w piecu, przedstawionym na rys. V-4, odbywa się za pomocą czterech wózków 1 poruszających się w kierunku promieniowym, przedstawionych w większej skali na rys. V-6. Wózki powyższe otrzymują ruch postępowo-zwrotny od silnika (nie pokazanego na rys. V-4) za pośrednictwem reduktora obrotów, wałków 2 i mechanizmu korbowego. Amplitudę ich ruchu (skok) można regulować. Wynosi ona średnio ok. 200 mm.

Wózki są ustawione w dolnej części pieca w specjalnych komorach wyładowczych. Nadwozie ich (rys. V-6) ma kształt schodków wznoszących

się w kierunku osi pieca. Przy ruchu wózka od środka na zewnątrz przesuwają się razem z nim również i wapno leżące na jego stopniach, a na miejsce przesuniętego opada warstwa wapna leżącego wyżej. Przy odwrotnym ruchu wózka wapno spada z niego do rynny odbiorczej.

Moc zużywana przez omówione urządzenie (rys. V-6), podobnie jak przez inne urządzenia wyładunkowe, jest mała i wynosi od 0,5 do 1 KM.

Na rys. V-7 jest przedstawiona dolna część pieca przesypowego systemu Isserlisa z urządzeniem do wyładowywania wypalonego wapna, również jego konstrukcji. Główną częścią tego urządzenia są żeliwne skrzydła obracające się wewnątrz korpusu z odpowiednią, dostosowaną do danego pieca prędkością. Usuwają one wapno w sposób równomierny niewielkimi porcjami. Piec systemu Isserlisa pracuje przy dolnym po-



Rys. V-8. Grzebień do wtłaczania powietrza pod wypełnienie szybu

dmuchu. Powietrze jest doprowadzane do szybu poprzez specjalne urządzenie, zwane grzebieniem, ułatwiające równomierne rozprowadzenie powietrza po przekroju poprzecznym pieca.

Konstrukcja jednego z takich grzebieni, ustawionych zwykle na samym dole strefy chłodzenia, jest przedstawiona na rys. V-8.

Piece szybowe z paleniskami zewnętrznymi. Piece przesypowe wymagają paliwa krótkopłomiennego, czyli koksu, który zapala się dopiero w temp. 600—700°C. Mając tak wysoką temperaturę zapłonu, koks w piecu przesypowym przechodzi nie paląc się przez prawie całą strefę podgrzewania. Spalanie koksu rozpoczyna się dopiero na samym dole tej strefy i przebiega normalnie w strefie wypalania.

Paliwa długopłomienne, zawierające dużo lotnych węglowodorów, mają znacznie niższą temperaturę zapłonu (węgiel kamienny np. zapala się w temp. 400—500°C, a węgiel brunatny — w temp. 250—450°C). Z tego powodu nie można ich stosować w piecach przesypowych, ponieważ spalanie odbywa się już w strefie podgrzewania, wskutek czego temperatura gazów odlotowych, a więc i straty cieplne znacznie wzrastają, a temperatura w strefie wypalania silnie się obniża. Bardzo ujemnie wpływa to na proces wypalania, często go wprost uniemożliwiając, ponieważ pomimo nadmiernego zużycia paliwa wypalanie nawet niewielkich kawałków kamienia wapiennego nie dobiega do końca i wewnątrz kawałków pozostaje niedopalone.

Paliwa długopłomienne (węgle: kamienny i brunatny, torf i drewno) można z powodzeniem wykorzystać w piecach szybowych z paleniskami zewnętrznymi.

Paleniska zewnętrzne pieców szybowych bywają dwóch rodzajów, a mianowicie paleniska do zupełnego spalania paliw i tzw. paleniska półgazowe do niezupełnego spalania. Konstrukcje jednych i drugich są oczywiście dostosowane do rodzaju paliwa, które w nich się spala.

W paleniskach z zupełnym spalaniem paliwa (na CO_2) potrzebna ilość powietrza (wraz z niezbędnym nadmiarem) jest doprowadzana bezpośrednio pod ruszty. Rozżarzone do temp. $1100\text{--}1200^\circ\text{C}$ produkty spalania, nie zawierające teoretycznie tlenku węgla, są kierowane z paleniska bezpośrednio do strefy wypalania, gdzie stykając się z ogrzanym w poprzedniej strefie kamieniem wapiennym — przekazują mu ciepło potrzebne do rozkładu węglanu wapniowego.

Ponieważ paliwa w strefie wypalania nie ma, powietrze w tej strefie nie jest potrzebne i nie jest również pożądane, gdyż obniżałoby temperaturę i rozcieńczałoby gazy. Z tego powodu strefa wypalania powinna być szczelnie oddzielona od strefy chłodzenia, co komplikuje budowę i działanie pieca. Poza tym wapno usuwane ze strefy wypalania w bardzo wysokiej temperaturze zawiera dużo ciepła, które nie jest następnie należycie wykorzystywane, co pociąga za sobą nadmiernie duże zużycie paliwa. Tym się tłumaczy, dlaczego paleniska zewnętrzne z zupełnym spalaniem węgla są bardzo rzadko stosowane w piecach szybowych do wypalania wapna. Znacznie częściej natomiast spotyka się paleniska półgazowe.

Do palenisk półgazowych, jak wiadomo, doprowadza się tylko tyle powietrza pierwotnego, aby go wystarczyło na wytworzenie tlenku węgla. Produkty niezupełnego spalania (czyli półgaz), zawierające dużo CO i posiadające temperaturę ok. 800°C , są odprowadzane z paleniska do strefy spalania pieca, gdzie spotykają się z dopływającym od dołu przez strefę chłodzenia powietrzem wtórnym ogrzanym do temperatury ok. 500°C , wskutek czego następuje spalanie półgazu, wydzielą się ciepło i temperatura w strefie wypalania podnosi się dostatecznie wysoko (do $1000\text{--}1100^\circ\text{C}$).

Powietrze wtórne, przepływając przez strefę chłodzenia, odbiera ciepło od wypalonego wapna, znacznie obniżając jego temperaturę. Wskutek przebiegu procesu spalania wewnątrz pieca i wyzyskaniu ciepła zawartego w wypalonym wapnie zużycie paliwa w piecu szybowym z paleniskami półgazowymi jest znacznie mniejsze niż w piecu z paleniskiem o zupełnym spalaniu węgla.

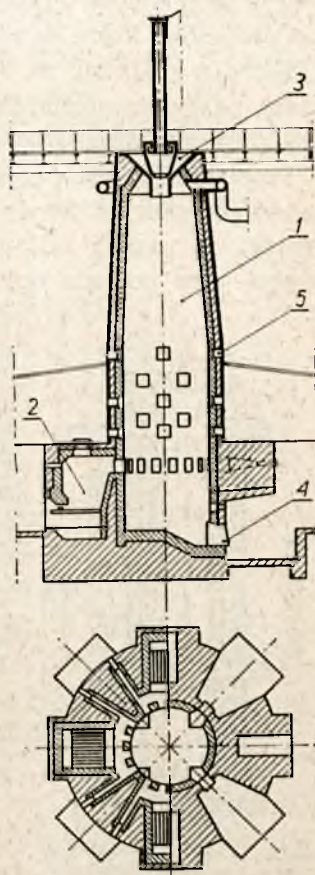
Na rys. V-9 przedstawiony jest piec wapienny z czterema paleniskami półgazowymi 2. Paleniska są wbudowane w piec, tworząc z nim jedną całość. Pomiędzy paleniskami na samym dole pieca znajdują się otwory 4 i wnęki do wyładowywania wapna. Półgaz bezpośrednio z paleniska

wchodzi do pieca przez otwory łączące palenisko z szybem. Tam spotyka się on z płynącym do góry ogrzonym powietrzem i ulega spalaniu. Najwyższa temperatura w szybie utrzymuje się tuż nad otworami, przez które dopływają gazy palne.

Zaletą pieców szybowych z zewnętrznymi paleniskami w porównaniu z piecami przesypowymi jest nie tylko możliwość spalania w nich paliw długopłomiennych, lecz również otrzymywanie czystego wapna nie zanieczyszczonego popiołem i żużlem, ponieważ nie styka się ono z paliwem stałym. Piece szybowe z paleniskami zewnętrznymi mają również wady, z których najważniejszymi są: bardziej skomplikowana budowa, mniej dogodnie wybieranie wapna palonego, trudniejsza obsługa i większe (od 10 do 15%) niż w piecach przesypowych zużycie paliwa.

Piece szybowe do wypalania wapna buduje się o różnych wymiarach, od małych — o wydajności kilkunastu ton wapna palonego na dobę — do dużych — o wydajności do 200 ton na dobę (piec Solvaya). Dla oceny celowości stosowania poszczególnych konstrukcji porównuje się ze sobą sprawność pieców, zużycie paliwa na wypalenie 1 t wapna i wydajność jednostkową (lub natężenie 1 m^3 szybu), czyli ilość wapna wypalonego w ciągu doby w przeliczeniu na 1 m^3 pojemności szybu.

Sprawność pieców przesypowych wynosi od 0,65 do 0,72, a z paleniskami zewnętrznymi — od 0,60 do 0,65, zużycie zaś paliwa w przeliczeniu na paliwo o wartości opałowej 7000 kcal/kg , czyli na tzw. paliwo „umowne”, wynosi w piecach wapiennych od 140 do 180 kg na 1 t wapna palonego. Wydajność jednostkowa pieców przesypowych przy obsłudze ręcznej i ciągu naturalnym wynosi ok. $400 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{dobę}$, przy ręcznej obsłudze i ciągu sztucznym — 450 do $550 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{dobę}$, a w piecach zmechanizowanych — od $650 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{dobę}$ (w piecu systemu Isserlisa) — do $900 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{dobę}$ (w piecu systemu Solvaya). Wydajność jednostkowa pieców z półgazowymi paleniskami zewnętrznymi jest na ogół mniejsza niż pieców przesypowych i wynosi od $300 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{dobę}$ przy obsłudze ręcznej i ciągu naturalnym do $600 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{dobę}$ przy ciągu sztucznym w piecach zmechanizowanych.



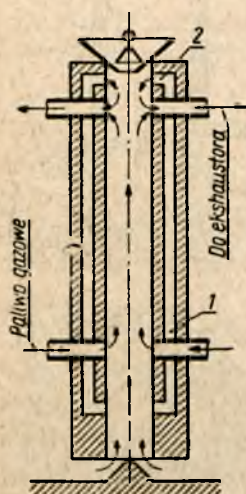
Rys. V-9. Piec wapienny z paleniskami zewnętrznymi: 1 — szyb, 2 — paleniska półgazowe, 3 — lej zasilający, 4 — otwór wydankowy, 5 — wzierniki

3. Piece szybowe do wypalania materiałów ceramicznych oraz do prażenia tlenków i siarczków metali

W przemyśle ceramicznym piece szybowe stosuje się do wypalania gliny, magnezytu, dolomitu itp. materiałów. Pracują one w zasadzie w sposób podobny jak rozpatrzone poprzednio piece do wypalania wapna. Różnice konstrukcyjne są spowodowane głównie koniecznością dostosowania tych pieców do własności fizycznych i chemicznych surowców oraz do procesów, które w nich zachodzą w czasie wypalania.

Glinę wypala się na szamot głównie w piecach szybowych z ogrzewaniem gazowym. Najczęściej stosowanym do tego celu piecem jest piec szybowy systemu Grossa.

Piec Grossa jest przeznaczony do wypalania glin bardziej wilgotnych (o wilgotności od 20 do 25%). Dla zapobieżenia kondensacji wilgoci zawartej w gazach odlotowych, co mogłoby spowodować zalepianie się szybu, piec posiada oprócz stref podgrzewania, wypalania i chłodzenia dodatkowo strefę wstępnego suszenia. Schemat pieca systemu Grossa przedstawiono na rys. V-10, a konstrukcję jego — na rys. V-11.



Rys. V-10. Schemat pieca systemu Grossa

Piec Grossa do wypalania gliny na szamot pracuje pod niewielką próżnią. Część powietrza ogrzanego w strefie chłodzenia płynie w tym piecu (rys. V-10) do góry bocznymi kanałami 1 w ścianach pieca i przez otwory 2 dostaje się do strefy wstępnego suszenia. Temperatura tego powietrza wynosi ok. 220°C. Ilość jego można zmieniać za pomocą specjalnych zasuw umieszczonych w kanałach pionowych i w ten sposób regulować ilość kierowanego do strefy wypalania powietrza potrzebnego do spalania paliwa gazowego.

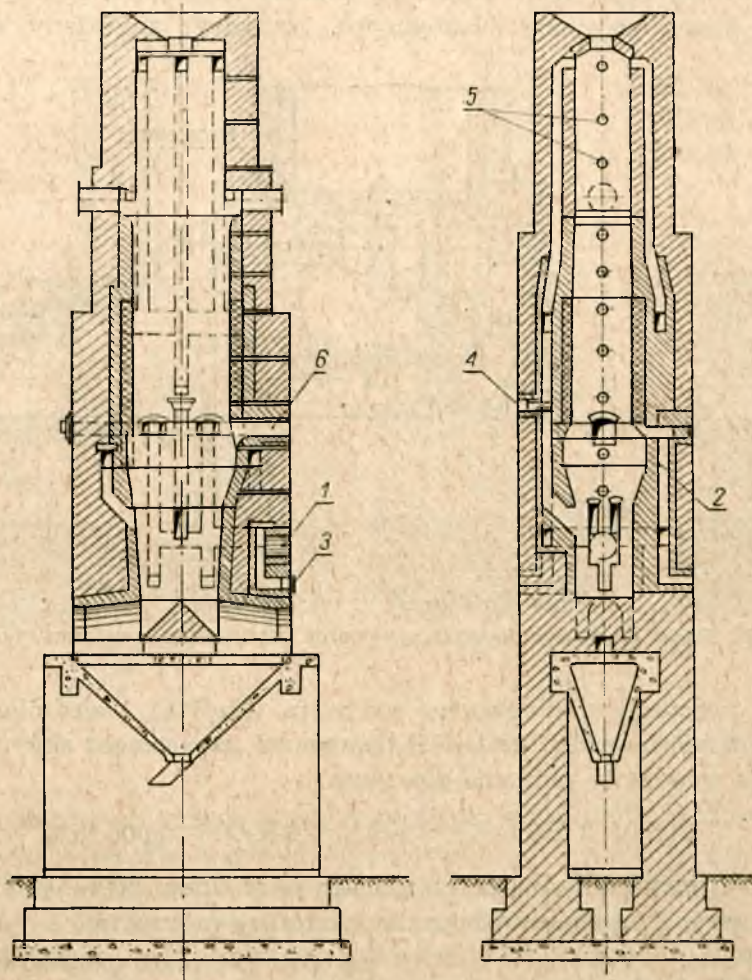
Piec pracuje przy próżni (podciśnieniu) wynoszącej przed palnikami 2 do 4 mm H₂O, w strefie wypalania — od 3 do 6 mm H₂O, a na gorze pieca — ok. 30 mm H₂O.

Konstrukcja pieca systemu Grossa jest przedstawiona na rys. V-11. Przez otwory 1 doprowadza się do pieca przewodem rurowym (nie pokazanym na rysunku) paliwo gazowe, które następnie kanałami 2 jest wprowadzane z kilku stron do strefy wypalania. Otwory 3 służą do oczyszczania kanałów gazowych z pyłu i smoły. Za pomocą zasuw 4 reguluje się ilość gorącego powietrza kierowanego do stref podgrzewania i wstępnego suszenia. Wzierniki 5 służą do obserwacji biegu procesu wypalania. W oknach 6 na poziomie wlotu do szybu paliwa gazowego (zwykle gazu generatorowego) znajdują się zastawki (lub kłapy) do regulowania jego ilości.

Przekrój poprzeczny szybu pieca Grossa jest prostokątny. Wydajność pieca przy wysokości szybu 15 m wynosi ok. 25 ton na dobę, zużycie paliwa umownego — od 2 do 2,5 ton na dobę, a wydajność jednostkowa — ok. 550 kG/m³ · dobę.

Oziębiony w strefie chłodzenia szamot dostaje się pod działaniem własnego ciężaru do leja wyładowczego znajdującego się pod szybem, skąd jest zbierany w sposób ciągły.

Wyładowywanie z pieców szybowych wypalonych materiałów ceramicznych w wielu piecach jest zmechanizowane. Stosuje się przy tym



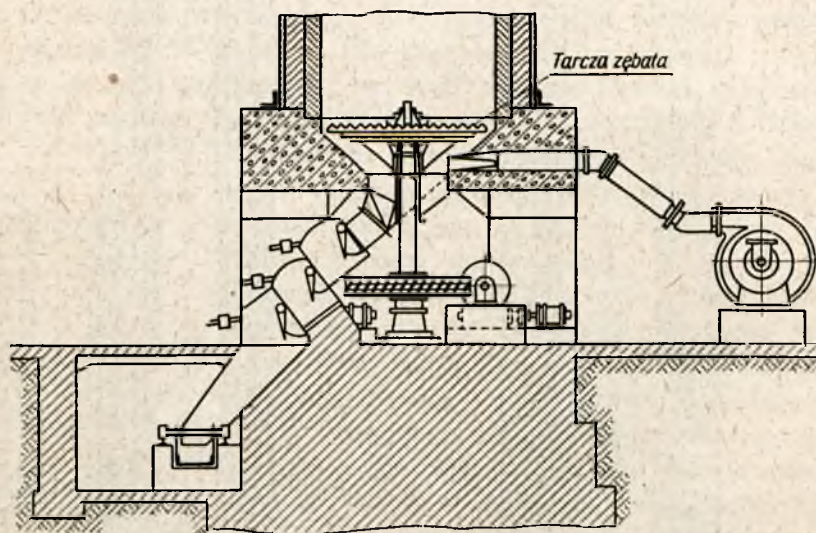
Rys. V-11. Piec systemu Grossa

albo takie same urządzenia jak do wyładowywania wapna (rys. V-6 i V-7), albo walce zębate, które wybierają równomiernie wypalony materiał z pieca, jednocześnie go rozdrabniając, lub ruszt obrotowy w postaci tarczy zębatej (rys. V-12).

Tarcza zębata (rys. V-12) posiadająca otwory pomiędzy zębami zabiera z pieca wypalony materiał. Odprowadzanie go spod tarczy odbywa się dla zapewnienia szczelności poprzez trzy kolejne komory zamykane automatycznie klapami z przeciwwagą.

Tarcza otrzymuje ruch obrotowy od silnika za pośrednictwem reduktora i przekładni ślimakowej. Zużycie mocy przy tym jest mniejsze od 1 KM.

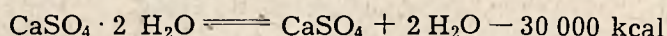
Na rys. V-13 przedstawiony jest piec szybowy do wypalania kamienia gipsowego, czyli gipsu surowego ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), na gips bezwodny (CaSO_4), znane pod nazwą anhydrytu. Anhydryt zmieszany w odpo-



Rys. V-12. Ruszt obrotowy do wyładowywania materiałów z pieców szybowych

wiedniej proporcji z siarczanem sodowym (Na_2SO_4) i siedmiowodnym siarczanem żelazawym ($\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$) stanowi tzw. cement anhydrytowy.

Reakcja wypalania kamienia gipsowego

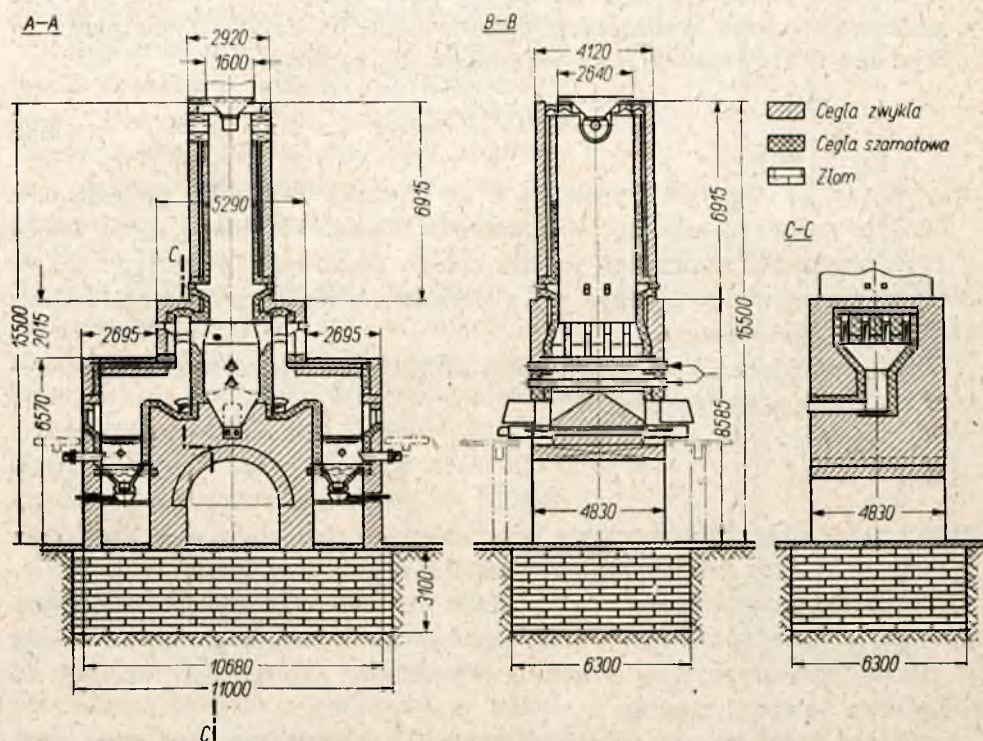


jest reakcją endotermiczną. Prowadzi się ją w temp. $600\text{--}700^\circ\text{C}$ w piecach szybowych z półgazowymi paleniskami zewnętrznymi.

Piec przedstawiony na rys. V-13 ma dwa paleniska półgazowe. Pierwotne powietrze doprowadza się pod ruszt, powietrze zaś wtórne — do strefy chłodzenia w celu stworzenia w strefie wypalania atmosfery utleniającej. Główne wymiary takiego pieca, o wydajności ok. 50 ton anhydrytu na dobę, są następujące: wysokość robocza szybu 8,2 m, wysokość stref podgrzewania i wypalania po 2 m, a strefy studzenia 2,25 m, objętość robocza szybu 41 m^3 .

Kamień gipsowy przebywa w strefie wypalania w temperaturze od 600 do 700°C ok. 3—4 godz, a cały proces wypalania na anhydryt trwa ok. 17—18 godz.

Ładowanie pieca kamieniem gipsowym odbywa się co 15 minut w ilości po 1 t. Powietrze jest doprowadzane do strefy chłodzenia albo przez górną rurę dziurkowaną przy drobnym kamieniu, albo przez dolną rurę przy grubszym kamieniu. Wentylator ssący powinien wytwarzać w strefie wypalania podciśnienie (próżnię) ok. 1,5—2 mm H₂O. Temperatura



Rys. V-13. Piec szybowy do wypalania kamienia gipsowego na anhydryt

gazów odlotowych z tego pieca wynosi ok. 130—150°C, zużycie paliwa umownego — ok. 7%, a sprawność — ok. 0,5.

Usuwanie anhydrytu z omawianego pieca jest zmechanizowane. Odbywa się ono w sposób ciągły za pomocą dwóch wózków o ruchu postępowo-zwrotnym, przedstawionych na rys. V-6. Temperatura anhydrytu opuszczającego piec jest dość wysoka i wynosi od 200 do 300°C. Tym się między innymi tłumaczy, dlaczego sprawność tego pieca nie jest wielka.

Obliczanie pieców szybowych do wypalania materiałów ceramicznych opiera się głównie na wzorach empirycznych, ustalonych na podstawie rozważań teoretycznych i danych praktycznych uzyskanych przy eksploatacji pieców istniejących.

Celem obliczeń jest ustalenie głównych wymiarów pieca, zużycie paliwa i oporów hydraulicznych.

Objętość szybu V oblicza się ze wzoru

$$V = \frac{G}{g} \text{ m}^3 \quad [\text{V-1}]$$

gdzie: G — wydajność pieca w kG/dobę ,

g — wydajność jednostkowa w $\text{kG/m}^3 \cdot \text{dobę}$.

Wydajność jednostkową g ustala się przy tym w oparciu o przyjęte w przemyśle normy wydajności jednostkowej dla danego typu pieca.

Średnicę D i wysokość H szybu oblicza się ze wzoru

$$V = \frac{\pi D^2}{4} H \text{ m}^3 \quad [\text{V-2}]$$

przyjmując, że stosunek wysokości H do średnicy D wynosi od 4 do 6.

Zużycie paliwa ustala się na podstawie bilansu cieplnego pieca, który w tym przypadku sporządza się dla całego pieca na 1 godz jego pracy. Otrzymany wynik porównuje się z normami zużycia umownego paliwa dla danego typu pieca.

Wydajność pieca G w kG/h można obliczyć, jeżeli są znane jego wymiary, z następującego wzoru:

$$G = \frac{\pi D^2 \cdot H \gamma_0}{4 \tau} \text{ kG/h} \quad [\text{V-3}]$$

gdzie: γ_0 — ciężar objętościowy przerabianego materiału w kG/m^3 ,

τ — czas przebywania materiału w piecu w godz.

Czas przebywania materiału w piecu zależy od wielkości kawałków. Materiał grubszy powinien dłużej przebywać w piecu, ponieważ należy go dłużej przetrzymać w strefie wypalania, a poza tym wolniej się podgrzewa i powoli stygnie.

Opór Δp , który stawia wypalany materiał przepływającym przez szyb gazom, oblicza się ze wzoru

$$\Delta p = \varphi H \left(\frac{Q}{F} \right) \text{ mm H}_2\text{O} \quad [\text{V-4}]$$

gdzie: Q — obciążenie cieplne pieca w kcal/godz ,

F — powierzchnia przekroju poprzecznego pieca w m^2 ,

φ — współczynnik równy od $0,35 \cdot 10^{-10}$ do $0,60 \cdot 10^{-10}$.

Obciążenie cieplne pieca $Q = G \cdot q$ kcal/godz , gdzie q jest to ogólna ilość ciepła (razem ze stratami) w kcal/kg , zużywana w piecu na wypalanie 1 kg materiału.

Piece szybowe do prażenia tlenków i siarczków metali kolorowych. Bardzo rozpowszechnione są piece szybowe w przemyśle metalurgicznym. Służą one, jak już poprzednio wspomniano,

do wytapiania surówki z rud żelaznych (wielki piec), do topienia żeliwa (żeliwiaki), do prażenia tlenków i siarczków metali kolorowych oraz do ich wytapiania.

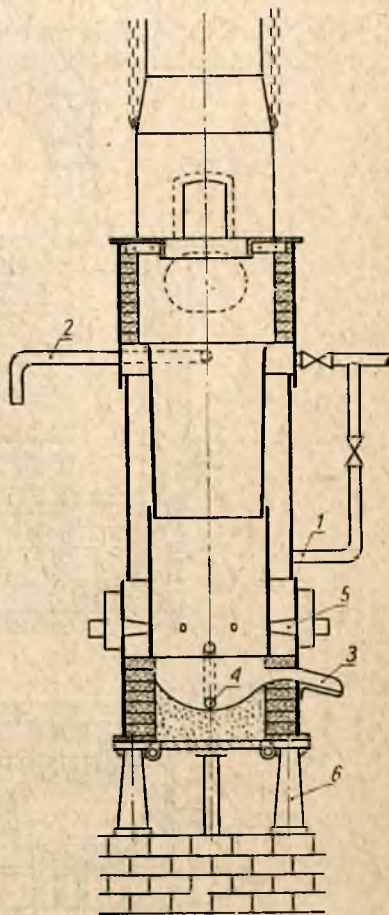
Dla przykładu rozpatrzmy piec szybowy z płaszczem wodnym do otrzymywania kamienia miedzianego, przedstawiony na rys. V-14. Wyprażony piryt miedziany topi się w tym piecu z koksem i topnikami na kamień miedziany, przy czym miedź, jako siarczek miedziawy Cu_2S , zbiera się w kamieniu miedzianym, a żelazo przechodzi do żużla jako krzemień żelazawy ($FeSiO_3$).

Dolna część szybu tego pieca (rys. V-14) jest wykonana o podwójnych ścianach ze stali. Pomiędzy nimi przepływa woda (Waterjacket). Woda chłodząca dopływa do płaszcza przewodem 1, a odpływa przewodem 2. Powstający w piecu żużel odpływa w sposób ciągły przez otwór i rynnę 3. Płynny kamień miedziany jest spuszczaany co jakiś czas, w miarę gromadzenia się go w szybie, przez otwór spustowy 4. Potrzebne do spalania koksu powietrze dopływa pod ciśnieniem przez dysze 5. Piec, jak widać na rys. V-14, spoczywa na czterech żeliwnych kolumnach 6.

Podobny w działaniu, lecz nieco inny w konstrukcji, jest piec szybowy do wytapiania ołowiu, przedstawiony na rys. V-15. W piecu tym przetapia się prażoną rudę ołowianą z koksem i topnikami. W rezultacie otrzymuje się ołów hutniczy, który gromadzi się na samym dole szybu. Nad nim zbiera się pewna niewielka ilość (do 3%) kamienia ołowianego, a na samej górze — żużel. Kamień ołowiany jest stopem eutektycznym PbS i FeS , zawierającym również niewielkie ilości Cu_2S ,

ZnS itp. Żużel zawiera od 25 do 30% SiO_2 , od 30 do 45% FeO i od 20 do 30% $CaO + Al_2O_3$, a czasami pewną ilość ZnO i do 2% PbO .

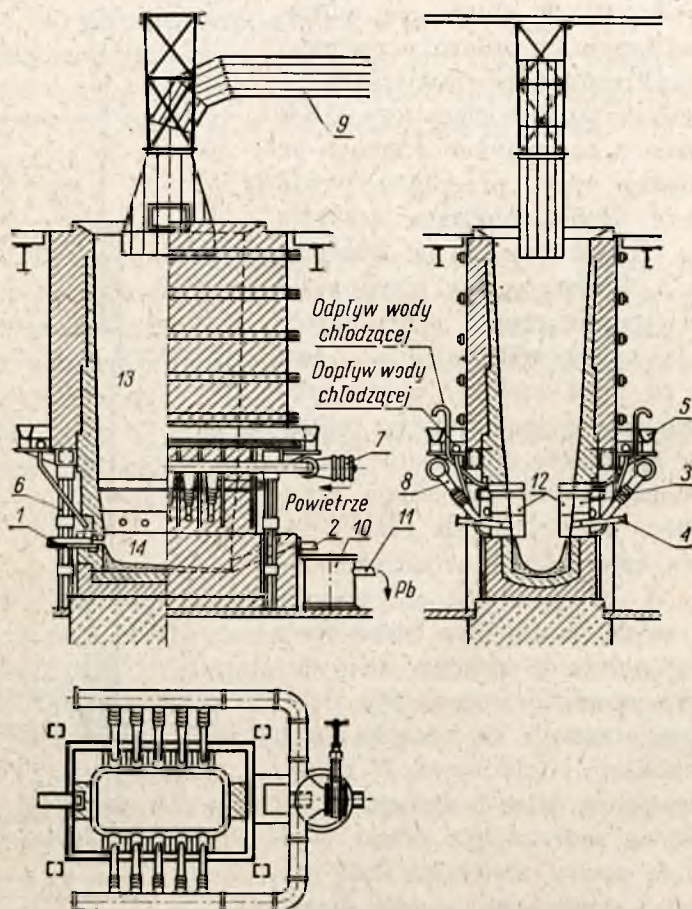
Szyb omawianego pieca do wytapiania ołowiu (rys. V-15) posiada wysokość ok. 7 m. Jego przekrój poprzeczny ma kształt prostokątny. Dolna część szybu, zwana tygłem, jest wyłożona szamotem. Z tygla przez otwór i rynnę 1 wypływa stale płynny żużel i kamień, a z najgłębszego miejsca pieca przez otwór i rynnę 2 — płynny ołów hutniczy. Płaszcz wodny



Rys. V-14. Piec szybowy z płaszczem wodnym do wytapiania kamienia miedzianego

składa się z trzech szeregów żeliwnych lub stalowych skrzynek 3 o ogólnej wysokości 1,2—1,5 m. Woda chłodząca dopływa do płaszcza przewodem 4 i odpływa do rynny 5.

Górna, obmurowana część szybu spoczywa na czterech słupach stalowych 6. Powietrze potrzebne do spalania koksu tłoczy wentylator przewodem 7. Dostaje się ono do szybu przez dziesięć dysz 8 umieszczonych



Rys. V-15. Piec szybowy do wytapiania ołowiu

po 5 z dwóch stron pieca wzdłuż jego dłuższych boków (rys. V-15). Gazy opuszczające piec są kierowane przewodem 9 do komory kondensacyjnej.

Ołów hutniczy w stanie roztopionym dostaje się rynną 2 do zbiornika 10, skąd jest rozprowadzany ruchomą rynną 11 do żeliwnych form, w których zastyga na sztaby. Płynny żużel i kamień dostają się z rynny 1 do stalowych garnków ustawionych na pomoście obrotowym, nie pokazanym na rysunku.

W piecach szybowych omówionego poprzednio typu można przetapiać na ołów hutniczy również i rudę nieprażoną. Wtedy zużycie koksu bywa znacznie większe, a poza tym powstaje dużo (od 10 do 15%) kamienia ołowianego. W przypadku przerobu rud ołowianych bogatych w miedź, kamień zawiera dużo Cu_2S . Wypraża się go ponownie i przetapia na czysty kamień miedziany i ołów hutniczy.

Ołów hutniczy nie nadaje się do użytku, ponieważ jest zanieczyszczony Cu, As, Sb, Bi, S i Ag oraz w mniejszych ilościach Fe, Zn, Co, Ni i Au. W celu usunięcia tych zanieczyszczeń i otrzymania technicznego ołowiu poddaje się go rafinowaniu.

PIECE KOMOROWE I KRĘGOWE**1. Wiadomości wstępne**

Piece komorowe i kręgowe są stosowane do wypalania wyrobów ceramicznych (cegły, dachówek i sączków), szlachetnej (wyrobów fajansowych i porcelanowych) i technicznej (części armatury elektrycznej), wyrobów ogniotrwałych (szamotu, dolomitu, dynasu i magnezytu), kamionkowych i kwasoodpornych. Poza tym piece komorowe można spotkać i w innych gałęziach przemysłu, np. w przemyśle metalowym, jako piece do termicznej obróbki lub do ogrzewania bloków stalowych w kuźniach. Są one również stosowane do wypalania wapna, ultramaryny, pręcików grafitowych do ołówków itd.

Proces wypalania wyrobów ceramicznych polega na tym, że pod działaniem wysokich temperatur zachodzą w materiałach ceramicznych liczne i dość skomplikowane przemiany fizyczne i chemiczne, wskutek czego zmienia się wewnętrzna struktura i własności wypalanych wyrobów.

Istota zachodzących w wypalanych przedmiotach zmian polega na większym lub mniejszym spiekaniu materiałów, z których zostały one wykonane. Płynna, szklista masa wytwarzająca się w wysokich temperaturach dookoła drobnych cząstek materiału, wiąże je przy stygnięciu, podnosząc bardzo wytrzymałość wypalonych wyrobów. Jednocześnie zachodzi szereg innych reakcji zmieniających własności materiałów (odwodnienie, tworzenie się stopów lub nowych związków chemicznych, rekrytalizacja itp.). Powstająca w procesie wypalania ciekła faza wypełnia całkowicie lub częściowo pory materiału, wskutek czego zachodzi kurczenie się wyrobów. Oczywiście, stopień spiekania, a więc i temperatura, w której spiekanie zachodzi, zależą od rodzaju wypalanych wyrobów i materiałów, z których zostały one wykonane. Przy wypalaniu np. wyrobów porcelanowych spiekanie prowadzi się do całkowitego zniszczenia porowatości, natomiast wypalone cegły ogniotrwałe posiadają ją jeszcze w większości przypadków w dość dużym stopniu.

Dla prawidłowego przebiegu pożądaných reakcji lub w celu zapobieżenia powstawaniu w materiale reakcji niepożądanych potrzebna jest

odpowiednia atmosfera w piecu. Na przykład przy wypalaniu wyrobów porcelanowych początkowo jest potrzebne środowisko utleniające w celu utlenienia wszystkich organicznych domieszek i zanieczyszczeń, a następnie atmosfera redukująca w celu redukcji znajdującego się w masie tlenku żelazowego na tlenek żelazawy. W innych przypadkach, np. gdy wypalany materiał zawiera tlenki tytanu, utrzymuje się atmosferę utleniającą, aby zapobiec ich redukcji. Przy wypalaniu wyrobów polewanych lub pokrytych szkliwem atmosfera w piecu powinna ułatwiać przebieg reakcji zachodzących w wypalanych materiałach z wydzieleniem się gazów.

Końcowa temperatura wypalania zależy nie tylko od rodzaju materiału, z którego są wykonane wypalane wyroby, ale również i od innych czynników, a między innymi od szybkości wzrostu temperatury w piecu. Czas przebywania wypalanych wyrobów zarówno w temperaturze końcowej, jak i w temperaturach pośrednich zależy od wielkości wyrobów i wysokości temperatury.

Podczas wypalania prawie zawsze zmienia się objętość wypalanych przedmiotów wskutek zmian strukturalnych w fazie stałej, kurczenia się przy zapełnianiu porów fazą ciekłą oraz rozszerzania i kurczenia przy ogrzewaniu i studzeniu wyrobów. Zmiany objętości nie zawsze zachodzą równomiernie. Często przyrost lub zmniejszenie się wymiarów poprzecznych przy wypalaniu przedmiotów nawet o niezbyt skomplikowanych kształtach powodują powstawanie w nich naprężeń wewnętrznych. Naprężenia powyższe są przyczyną odkształceń i pęknięć, którym czasami ulegają wypalane wyroby. Z tego powodu proces wypalania należy prowadzić w taki sposób, aby temperatury wypalanych wyrobów zmieniały się z prędkością, przy której naprężenia wewnętrzne nie przekraczałyby naprężeń dopuszczalnych.

Czas trwania tego procesu zależy w dużym stopniu od wymiarów wypalanych przedmiotów oraz od konstrukcji i wymiarów pieca. W piecach o dużym przekroju poprzecznym komory roboczej wypalanie trwa dłużej niż w piecach o małym przekroju, ponieważ różnice temperatur w różnych miejscach przekroju komory są większe, szczególnie jeżeli ma miejsce zasysanie zewnętrznego powietrza przez nieszczelności ścian. Usunięcie przyczyn wywołujących nierównomierny rozkład temperatur w przekroju poprzecznym pozwala na skrócenie czasu wypalania.

Piece komorowe można podzielić według cech konstrukcyjnych na jednokomorowe, dwukomorowe, wielokomorowe i kręgowo. Piece jedno- i dwukomorowe są to piece o działaniu okresowym, piece zaś wielokomorowe i kręgowo można zaliczyć do pieców o działaniu ciągłym.

Piece o działaniu okresowym pod wielu względami ustępują piecom o działaniu ciągłym. Wykazują one następujące wady:

- 1) duże straty ciepła związane z okresowym ogrzewaniem i następnie studzeniem obmurza,

2) duże straty ciepła z gazami odlotowymi, których temperatura w końcu procesu wypalania jest wysoka, gdyż zawsze przekracza temperaturę wypalanych wyrobów,

3) nadmierne wydłużanie czasu podgrzewania, wypalania i studzenia wyrobów wskutek akumulacji ciepła przez obmurze,

4) powstawanie nieszczelności w obmurzu wskutek okresowego ogrzewania i studzenia pieca,

5) konieczność stosowania wewnątrz pieca cegieł odpornych na zmiany temperatur,

6) uciążliwe i pochłaniające sporo pracy ładowanie i wyładowywanie wypalanych przedmiotów.

Do zalet pieców o działaniu okresowym należą:

1) prosta konstrukcja,

2) niskie koszty budowy,

3) łatwość dostosowania przebiegu procesu wypalania do indywidualnych wymagań wypalanych materiałów, co pozwala na uzyskanie wyrobów lepszej jakości.

Obecnie piece o działaniu okresowym buduje się wyłącznie do wypalania wyrobów o dużych wymiarach, wyjątkowo skomplikowanych kształtach lub wyrobów specjalnych, wymagających zachowania innych warunków w czasie wypalania niż warunki dla podstawowych wyrobów produkowanych przez dany zakład przemysłowy i wypalanych w piecach o działaniu ciągłym.

2. Piece jedno- i dwukomorowe

Piece jednokomorowe o działaniu okresowym stosuje się, jak już było zaznaczone poprzednio, nie tylko w przemyśle ceramicznym, ale i w innych przemysłach, np. w przemyśle metalowym do termicznej obróbki i do ogrzewania bloków stalowych w kuźniach. Niewielki stosunkowo piec do ogrzewania półfabrykatów stalowych przed kuciem jest przedstawiony w sposób uproszczony na rys. VI-1. Komora robocza tego pieca ma kształt prostopadłościanu o szerokości 900 mm, wysokości 700 mm i długości 1450 mm. Ogrzewane półfabrykaty leżą na trzonie pieca. Ładowanie ich i wyładowywanie odbywa się przez otwór roboczy zamykany drzwiczkami. Piec jest ogrzewany paliwem gazowym lub ciekłym, które doprowadzane przez odpowiednie palniki spala się wewnątrz komory roboczej. Gazy spalinowe są odprowadzane kanałami dymowymi poprzez rekuperator iglasty do komina.

W celu równomiernego ogrzewania wyrobów znajdujących się w komorze roboczej pieca należy utrzymywać we wszystkich jej punktach możliwie jednakową temperaturę, wyższą od temperatury ogrzewanych wyrobów o 100—150°C. Osiąga się to przez umieszczenie palników

w dwóch przeciwległych stronach pieca. Temperatura opuszczających piec gazów spalinowych pomimo ustawienia rekuperatora jest dość wysoka, a sprawność pieca waha się w granicach od 10 do 20%.

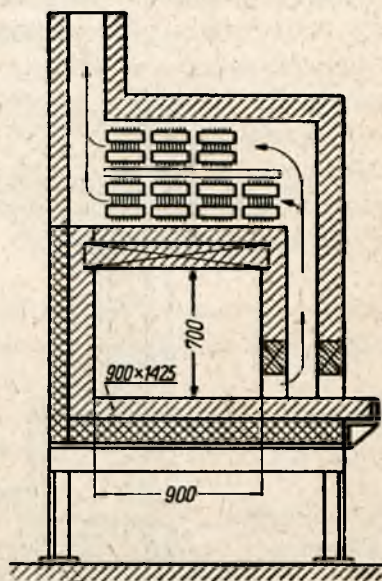
Piece jednokomorowe do wypalania wyrobów ceramicznych bywają o płomieniu wznoszącym się do góry i o płomieniu zwrotnym. W pierwszym przypadku gazy spalinowe dostają się do komory roboczej pieca od dołu i wychodzą przez jeden lub więcej (w celu wyrównania rozkładu temperatur w piecu) otworów w sklepieniu. W drugim przypadku spaliny wnoszą się początkowo do góry, a następnie pod sklepieniem zmieniają kierunek, opadają na dół i są odprowadzane przez otwory w dnie komory do kanałów zbiorczych, skąd kierowane są do komina (rys. VI-2). Rozkład temperatur w tych piecach jest bardziej równomierny niż w piecach o płomieniu wznoszącym się do góry, które uważane są obecnie za przestarzałe i dlatego coraz rzadziej się je spotyka.

Pojemność jednokomorowych pieców waha się w bardzo dużych granicach od 1 do 500 m³. Zależy ona nie tylko od wydajności pieca, ale również i od potrzebnej równomierności rozkładu temperatur w całej jego objętości. Im objętość komory roboczej jest większa, tym mniejsza, jak wiadomo, jest powierzchnia wewnętrzna ścian, przypadająca na 1 m³ komory, a więc tym mniejsze są straty ciepłe na zewnątrz i na ogrzewanie obmurza. Ze względu więc na straty ciepłe bardziej są ekonomiczne piece o dużej pojemności.

Z drugiej strony ze wzrostem objętości pieca powiększa się nierównomierność rozkładu temperatur w jego komorze roboczej, co powoduje konieczność nadmiernego przedłużenia procesu wypalania w celu skompensowania powyższej nierównomierności, ponieważ w przeciwnym przypadku otrzymuje się zbyt duży procent braków.

Przedłużenie procesu wypalania powoduje wzrost zużycia paliwa i przedłużenie czasu chłodzenia, albowiem obmurze w tym przypadku silniej się przegrzewa. Poza tym zmniejsza się wydajność pieca, przypadająca na jednostkę jego objętości, i wzrasta zużycie pracy na 1 t wypalanych wyrobów.

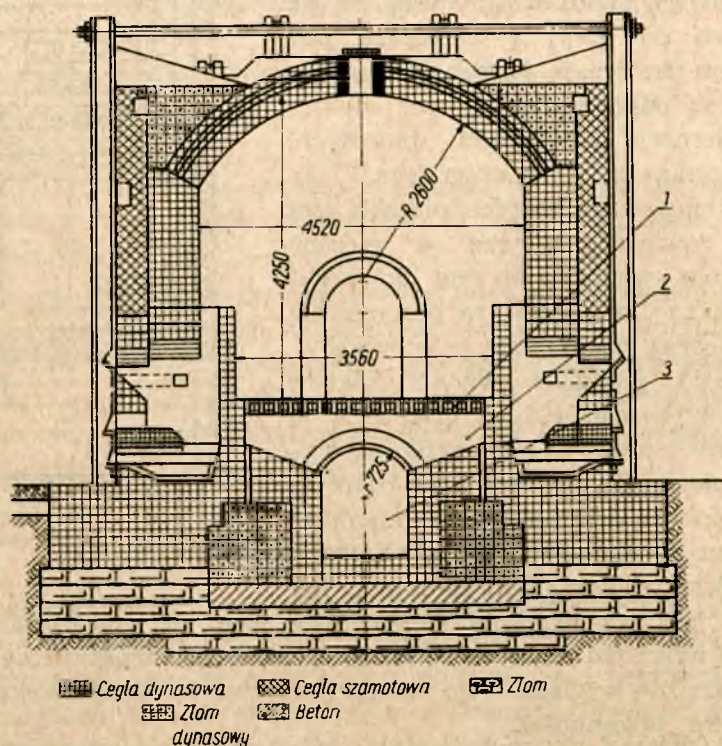
Przyczyny powyższe ograniczają możliwość powiększania objętości pieców komorowych o działaniu okresowym. Uwzględniając potrzebną szybkość przyrostu temperatury w piecu, jej wysokość, dopuszczalny stopień



Rys. VI-1. Piec komorowy do ogrzewania półfabrykatów stalowych

nierównomierności i inne warunki wypalania produkowanych wyrobów, ustala się optymalne, najbardziej dla danej produkcji ekonomiczne wymiary pieca. Im proces wypalania trwa dłużej oraz im jest większa dopuszczalna nierównomierność rozkładu temperatur, tym wymiary pieca mogą być większe. Należy jednak pamiętać, że piece o dużej pojemności mają w wielu przypadkach bardziej skomplikowaną konstrukcję.

Uwagi powyższe potwierdzono w praktyce. Porcelanę techniczną np. wymagającą podczas wypalania bardziej równomiernej temperatury



Rys. VI-2. Piec komorowy o płomieniu zwrotnym do wypalania wyrobów dynasowych: 1 — posadzka ażurowa, 2 — kanały zbiorcze, 3 — czopuch

wypala się w stosunkowo małych piecach o pojemności od 50 do 100 m³, natomiast do wypalania porcelany stołowej i wyrobów fajansowych, dopuszczających wypalanie w nieco szerszym zakresie temperatur, stosuje się piece komorowe o pojemności od 100 do 200 m³. W piecach o większej objętości (do 400—500 m³) wypala się wyroby ogniotrwałe.

Piece komorowe bywają prostokątne i okrągłe. Przy jednakowych objętościach piece okrągłe mają mniejszą powierzchnię boczną i mniejszą objętość obmurza. Z tego powodu straty ciepła do otoczenia i na ogrzewanie obmurza są w piecach okrągłych o 2—5% mniejsze niż w piecach

prostokątnych. Piece okrągłe ze względów budowlanych są bardziej trwałe od pieców prostokątnych, a poza tym w piecach okrągłych o pojemności od 50 do 200 m³ łatwiej rozmieścić równomiernie paleniska niż w piecach prostokątnych o tej samej wielkości.

Dużą i w wielu przypadkach decydującą zaletą pieców prostokątnych jest łatwość umieszczenia ich w budynku fabrycznym. Z tego powodu małe piece komorowe o pojemności do 50 m³ i duże o pojemności od 300 do 500 m³ prawie zawsze mają kształt prostokątny.

Wysokość komory roboczej pieców do wypalania wyrobów ceramicznych zależy od wytrzymałości na ściskanie dolnych warstw wyrobów pod ciężarem warstw górnych. Przy wypalaniu cegły i wyrobów ogniotrwałych wysokość komory waha się w granicach od 2,5 do 4 m. W przypadku wypalania w kapslach (np. porcelany stołowej), posiadających dość dużą wytrzymałość, wysokość jej dochodzi do 5,5 m (a w piecach budowanych dawniej — nawet do 7 m).

Średnica komór okrągłych do wypalania porcelany technicznej wynosi od 3,8 do 6 m, do wypalania porcelany stołowej — od 6 do 8 m, a do wypalania wyrobów ogniotrwałych — od 5,5 do 11,5 m.

W piecach prostokątnych stosunek boków komory roboczej równa się ok. 1 : 2,5, szerokość zaś waha się w zależności od wielkości pieca od 2,5 do 5,5 m.

Grubość ścian pieców jednokomorowych ze względów budowlanych wynosi od 0,9 do 1,2 m. W ścianach znajdują się otwory, tzw. furty, o wysokości ok. 1,8 m i szerokości 0,8 m. Ładuje się przez nie do komory roboczej wyroby surowe i wyładowuje się wyroby wypalone. Furty po załadowaniu komory zamurowuje się dwiema ścianami o grubości 1 cegły każda. Przestrzeń między ścianami czasami wypełnia się żużlem lub gruzem.

Konstrukcja sklepienia w piecach jednokomorowych zależy od kształtu pieca. Piece prostokątne mają zwykle wysokie sklepienia cylindryczne ze względu na powstające w nich stosunkowo małe naprężenia statyczne i termiczne. Sklepienia pieców okrągłych są zwykle kształtu sferycznego (kopulastego). Ostatnio w piecach jednokomorowych do wypalania w wysokich temperaturach wyrobów ogniotrwałych zaczęto stosować sklepienia wiszące.

Do ogrzewania pieców jednokomorowych stosuje się paliwo stałe, paliwa ciekłego używa się tylko w piecach o mniejszych wymiarach lub w krajach bogatych w ropę naftową. Paliwo gazowe, szczególnie o niskiej wartości opałowej, nie zawsze daje możliwość uzyskania potrzebnej temperatury bez poprzedniego podgrzewania powietrza i gazu palnego. Instalowanie w tym celu rekuperatorów i regeneratorów komplikuje konstrukcję pieca, zwiększa koszt budowy i utrudnia obsługę. Z tego powodu paliwo gazowe rzadko się stosuje w piecach jednokomorowych do wypalania wyrobów ceramicznych.

Paleniska do paliw stałych umieszcza się w piecach okrągłych symetrycznie na ich obwodzie, w piecach zaś prostokątnych o szerokości powyżej 5 m — z dwóch stron pieca, a w piecach węższych — tylko z jednej strony.

Dla uzyskania w komorze roboczej pieca możliwie równomiernego rozkładu temperatur buduje się, w zależności od pojemności pieca, od 4 do 12 palenisk o powierzchni rusztów od 0,5 do 1,5 m².

Wielkość palenisk oblicza się, zakładając na podstawie danych doświadczalnych sumaryczną powierzchnię rusztów, przypadającą na 1 m³ pojemności komory roboczej pieca albo na 1 m² powierzchni jego trzonu, lub opierając się na dopuszczalnym naprężeniu powierzchni rusztu.

Przy wypalaniu wyrobów ceramicznych w małych piecach, o pojemności do 100 m³, sumaryczna powierzchnia rusztów wynosi od 0,15 do 0,10 m² na 1 m³ pojemności pieca lub od 30 do 25% powierzchni dna, a w piecach większych, o pojemności od 100 do 200 m³, wynosi ona od 0,07 do 0,04 m² na 1 m³ pojemności pieca lub od 15 do 25% powierzchni dna. Przy wypalaniu wyrobów porcelanowych i fajansowych sumaryczna powierzchnia rusztów dla węgla kamiennego wynosi od 0,04 do 0,08 m² na 1 m³ pojemności, a dla torfu i drewna — od 0,07 do 0,10 m² na 1 m³.

Paleniska w piecach jednokomorowych buduje się najczęściej jako półgazowe, przy czym początkowo bezpośrednio po załadowaniu pieca prowadzi się w nich spalanie zupełne, utrzymując na ruszcie odpowiednio cieńszą warstwę paliwa i doprowadzając możliwie największą potrzebną ilość pierwotnego powietrza. Osiąga się przez to bardziej równomierny w pierwszym stadium wypalania rozkład temperatur w komorze roboczej na różnych jej wysokościach i zapobiega się kondensacji pary na powierzchni zimnych jeszcze wyrobów.

Gdy temperatura w piecu osiągnie 600—900°C, w celu otrzymania półgazu przestawia się proces spalania w palenisku ze spalania zupełnego na niezupełne. Aby to osiągnąć, powiększa się odpowiednio grubość warstwy paliwa na ruszcie i opuszcza się nieco zasuwę kominową dla uzyskania w komorze roboczej pieca na — poziomie jej dna — ciśnienia zerowego.

Po przestawieniu paleniska na proces półgazowy doprowadza się jednocześnie powietrze wtórne i proces spalania półgazu przenosi się do komory pieca. Następuje przez to stopniowe zmniejszanie się różnicy temperatur pomiędzy górnymi i dolnymi warstwami wypalanych wyrobów. Różnica ta może być doprowadzona w końcu procesu do 25—20°C.

Na rys. VI-2 jest przedstawiony prostokątny piec komorowy do wypalania wyrobów dynasowych, z półgazowymi paleniskami zewnętrznymi oddzielonymi od komory ścianami przewalowymi. Paleniska w tym piecu nie mają rusztów. Są one zastąpione małym, wystającym w głąb paleniska sklepieniem z cegły ogniotrwałej. Gazy spalinowe po wyjściu z paleniska kierują się początkowo do góry, a następnie pod sklepieniem za-

wracają i, opadając na dół, płyną pomiędzy znajdującymi się w komorze wyrobami, przekazując im swoje ciepło. W posadzce tego pieca znajduje się szereg otworów, przez które gazy spalinowe przepływają do kanałów zbiorczych, a następnie do czopucha.

Dla prawidłowego ruchu gazów w komorze na dół i zabezpieczenia równomiernego ich przenikania przez całą masę wypalanych wyrobów oraz ogrzewania możliwie ze wszystkich stron każdego wypalanego przedmiotu wyroby należy ustawiać w piecu bardzo starannie i równomiernie z zachowaniem odpowiednich odstępów. Ustawianie wyrobów ze względu na wydajność pieca powinno być możliwie gęste i dostatecznie trwałe, aby w czasie wypalania nie ulegały one wywracaniu.

Przeciętna gęstość układania różnych wyrobów w piecach komorowych wynosi dla:

cegły dynasowej	950 — 1100 kg/m ³
cegły szamotowej	850 — 1000 kg/m ³
prostych kształtek ceramicznych	800 — 900 kg/m ³
bardziej złożonych kształtek ceramicznych	700 — 800 kg/m ³
rur kanalizacyjnych	250 — 300 kg/m ³
plytek wykładzinowych	180 kg/m ³
fajansowych wyrobów sanitarnych	120 kg/m ³
porcelany stołowej	80 — 100 kg/m ³

Przy zbyt gęstym układaniu wyrobów w piecu przepływ gazów przez komorę roboczą jest utrudniony, co powiększa różnicę temperatur między górą i dołem pieca oraz powoduje niedostateczne wypalenie wyrobów w miejscach, gdzie były one ustawione gęściej, i przepalenie w miejscach, gdzie były ustawione rzadziej.

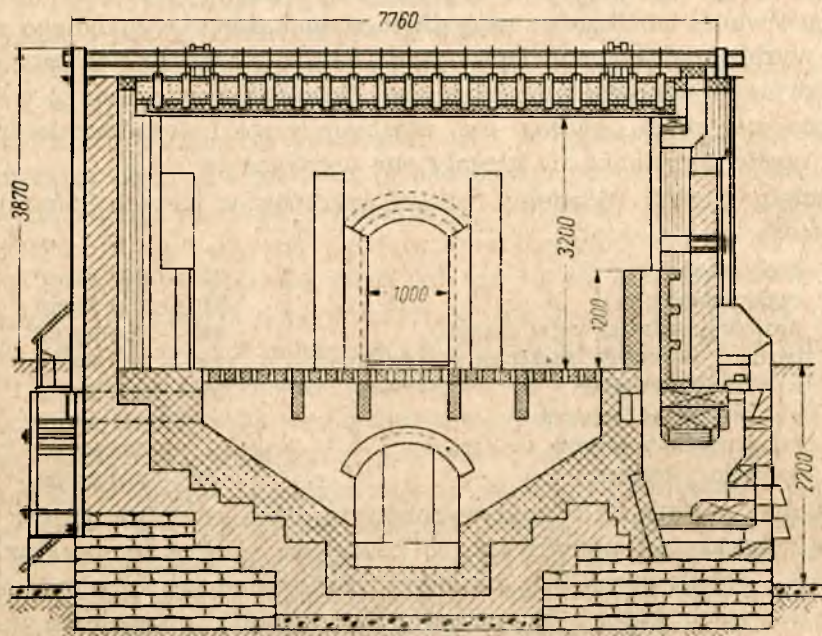
Aby rozkład temperatur w piecu na jednakowej wysokości był bardziej równomierny, opór otworów w posadzce komory powinien być większy niż kanałów zbiorczych i czopucha. Z tego powodu ogólna powierzchnia otworów w posadzce jest mniejsza od przekroju poprzecznego dalszych kanałów. Zwykle ogólna powierzchnia otworów w posadzce wynosi od 3 do 4% powierzchni posadzki, a powierzchnia przekroju poprzecznego kanałów odprowadzających gazy spalinowe spod posadzki jest od 1¹/₂ do 2 razy większa.

Wypalone materiały w piecu komorowym chłodzi się powietrzem dopływającym do komory przez otwór powstały wskutek wyburzenia w tym celu dolnej części ściany, którą była zamurowana furta oraz przez paleniska. Ogrzane powietrze odprowadza się przez jeden lub kilka otworów w sklepieniu. Otwory powyższe w czasie wypalania są szczelnie zamknięte płytą lub zasuwą szamotową.

Na rys. VI-3 jest przedstawiony przekrój poprzeczny podobnego, lecz nieco większego i bardziej nowoczesnego pieca jednokomorowego ze sklepieniem wiszącym. Sklepienia wiszące nie wywołują sił rozpierających boczne ściany pieca, wskutek czego mogą być one cieńsze, przez co straty

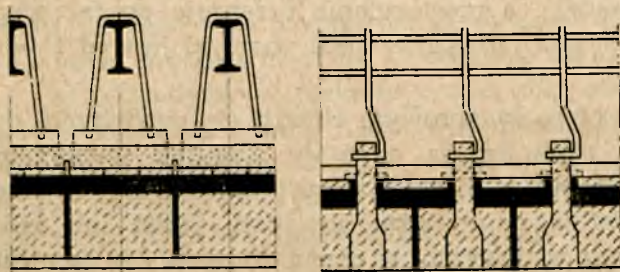
ciepła na ich ogrzewanie są mniejsze. Poza tym omawiane sklepienia są trwalsze i zabierają mniej czasu na remonty niż sklepienia cylindryczne.

Wiszące sklepienia, których konstrukcja jest pokazana na rys. VI-4, wykonuje się z oddzielnych bloków. Każdy blok składa się z trzech kształtek (kamieni) ceramicznych, z których środkowa jest zawieszona za pomocą stalowego haka na belce dwuteowej, a boczne są osadzone



Rys. VI-3. Przekrój poprzeczny pieca komorowego ze sklepieniem wiszącym

z dwóch stron na belce środkowej. Dla osiągnięcia większej szczelności szwy sklepienia są przykryte cienkimi płytami na zaprawie z gliny ogniotrwałej, pyłu magnezytowego i szkła wodnego.

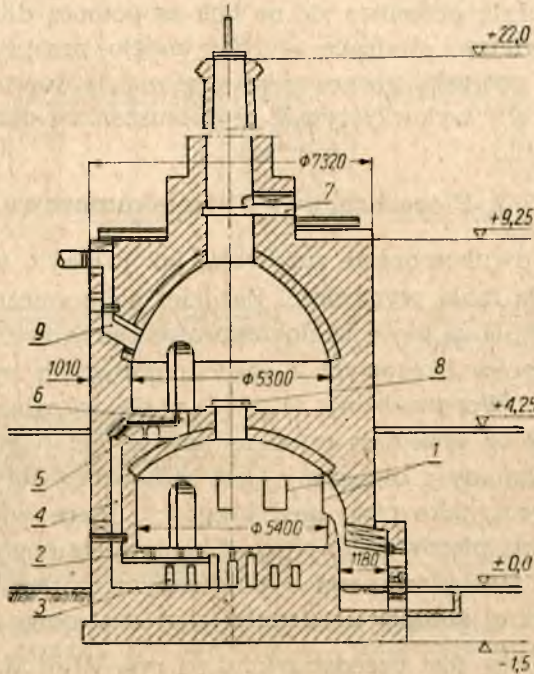


Rys. VI-4. Sklepienie wiszące

Zużycie paliwa w piecach jednokomorowych do wypalania wyrobów ceramicznych jest zawsze większe niż w piecach innych typów. Główną przyczyną tego jest praca okresowa i związane z nią duże straty ciepła. W zależności od wymiarów pieca, gęstości układania w nim wyrobów

oraz temperatury wypalania straty ciepła, unoszonego z gazami odlotowymi, w piecach jednokomorowych wynoszą od 35 do 50%, a straty na ogrzewanie obmurza — od 5 do 25%. Uwzględniając i inne straty (wskutek promieniowania, niezupełnego spalania i w żużlu), łatwo jest zrozumieć, że sprawność pieców jednokomorowych jest mała.

W celu zmniejszenia strat ciepłych czasami buduje się obok siebie dwa piece komorowe (piece bliźniacze) lub piece piętrowe. W przypadku pieców bliźniaczych gorące powietrze opuszczające jeden z pieców podczas studzenia wypalonych wyrobów jest wprowadzane do drugiego pieca świeżo załadowanego, gdzie suszy się i stopniowo ogrzewa wyroby suro-



Rys. VI-5. Piec piętrowy do wypalania wyrobów porcelanowych

we, natomiast w piecach piętrowych lepiej wykorzystuje się ciepło gazów spalinowych.

Na rys. VI-5 jest przedstawiony piec piętrowy do wypalania porcelany stołowej i fajansu. Porcelanę wypala się dwukrotnie: początkowo słabiej w temperaturze ok. 900°C na biskwit, a następnie ze szkliwem w temp. 1350—1450°C. W celu zabezpieczenia wyrobów w czasie wypalania od zanieczyszczenia wypala się je w kapslach, tj. w skrzynkach z gliny ogniotrwalej.

W dolnej komorze pieca, przedstawionego na rys. VI-5, zachodzi wypalanie w wyższej temperaturze wyrobów ze szkliwem. Gazy spalinowe dostają się do tej komory z palenisk zewnętrznych kanałami 1, wznoszą

się przy ścianach pieca do góry i następnie opadają bliżej jego środka w dół. Opuszczają one dolną komorę przez szereg otworów 2 w posadzce pieca, dostają się do koncentrycznych kanałów zbiorczych 3 i następnie pionowymi kanałami 4 przepływają do pierścieniowego kanału 5, skąd przez otwory 6 wchodzi do górnej komory. W komorze tej wypala się porcelaną lub fajans bez szkliwa. Gazy spalinowe przepływają przez górną komorę z dołu do góry. Opuszczają one piec przez komin, u podstawy którego znajduje się zasuw 7 do regulowania ciągu.

Otwór w sklepieniu dolnej komory, łączący ją z komorą górną, jest przykryty w czasie wypalania płytą szamotową 8. Po zakończeniu procesu wypalania płytę przesuwają na bok za pomocą długiego pręta stalowego, aby powietrze studzące wyroby mogło przepływać przez obie komory. W razie potrzeby gorące powietrze można doprowadzać z górnej komory kanałem 9 i wykorzystywać je do suszenia i ogrzewania.

3. Piece kręgowe i wielokomorowe

Piece jedno- i dwukomorowe zużywają, jak już było wyjaśnione, dużo paliwa i wykazują małą wydajność. Bardziej ekonomiczne z punktu widzenia zużycia ciepła są piece wielokomorowe i kręgowe.

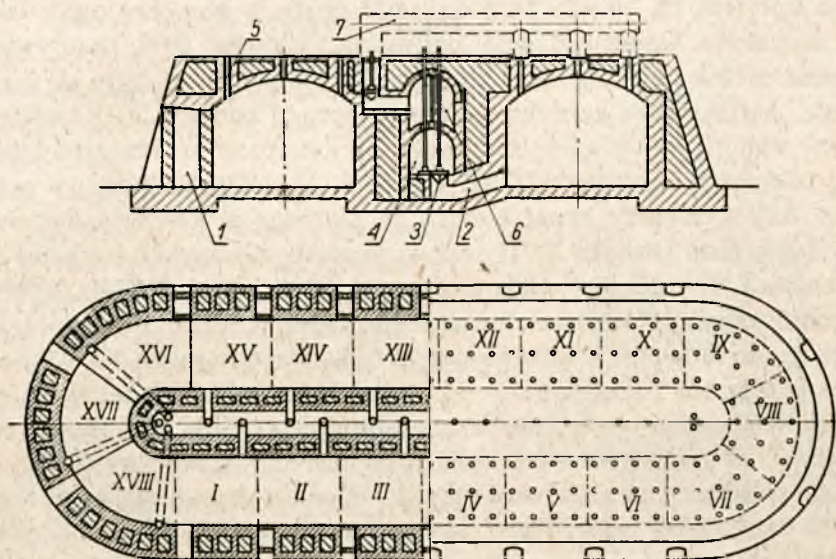
Prototypem pieców kręgowych i wielokomorowych był piec pierścieniowy Hoffmana. Wprowadzony w 1857 r. do wypalania cegieł budowlanych wywołał on przewrót w cegielnictwie. Od tego czasu piec ten, wielokrotnie zmieniany i ulepszany, jest stosowany dotychczas w przemyśle ceramicznym, jako tzw. piec kręgowy. Piece wielokomorowe są w zasadzie odmianą pieców kręgowych. Składają się one z szeregu komór oddzielonych od siebie ścianami i połączonych kanałami, przez które przepływają z jednej komory do drugiej gazy spalinowe i powietrze.

Piec kręgowy jest przedstawiony na rys. VI-6. Ma on kształt wydłużonego, owalnego kanału szerokości od 3 do 5 m i wysokości od 2,2 do 2,8 m. Kanał ten jest podzielony papierowymi przegrodami, które w odpowiednich temperaturach spalają się, na komory o długości od 5 do 7 m. Ilość takich komór w piecu kręgowym normalnie wynosi od 16 do 24. W każdej komorze znajduje się furta do ładowania wyrobów surowych i wyładowywania wyrobów wypalonych oraz przewód, zamykany specjalnym dzwonem, do odprowadzania gazów spalinowych do wspólnego kanału dymowego. Furta normalnie jest zamurowana. Odmurowuje się ją tylko na okres potrzebny do wyładowania cegły wypalanej i załadowania świeżej. W sklepieniu komór pieca w odstępach co 1—1,2 m wzdłuż jego osi znajdują się otwory (czeluście), o średnicy od 150 do 200 mm, zaopatrzone w pokrywy, przez które doprowadza się do pieca paliwo. Grubość ścian pieca kręgowego jest dość duża i wynosi od 1,2 do

2 m, wskutek czego objętość kanału roboczego pieca stanowi od 25 do 40% objętości pieca, liczonej wg jego wymiarów zewnętrznych.

Piec przedstawiony na rys. VI-6 ma 18 komór, z których pierwsze siedem zawiera w danym czasie cegłę wypaloną, w komorze VIII utrzymuje się ogień, w niej odbywa się wypalanie; w następnych ośmiu komorach (od IX do XVI) znajduje się cegła niewypalona. Z komory XVII wyładowuje się cegłę wypaloną i ostudzoną, a do komory XVIII ładuje cegłę świeżą.

Furta w komorze I jest odmurowana, przez nią dostaje się do pieca powietrze (dopływa ono również przez komorę XVIII). Przepływa ono



Rys. VI-6. Piec kręgowy: 1 — furta, 2 — kanał dymowy, 3 — zawór dzwonowy, 4 — główny kanał dymowy, 5 — czeluście, 6 — kanał powietrzny, 7 — przestawna rura stalowa

między cegłami przez komory I—VII, studzi je, ogrzewając się równocześnie do temperatury ok. 300°C. Część tego powietrza wchodzi następnie do komory VIII, gdzie odbywa się proces spalania paliwa. Ponieważ ilość powietrza potrzebnego do spalania jest znacznie mniejsza od ilości potrzebnej do studzenia wypalonych cegieł, pozostałą jego część kieruje się z komory VII poprzez czeluście, przestawne rury stalowe 7 i kanał powietrzny, znajdujący się nad głównym kanałem dymowym, do komór XIV, XV i XVI, gdzie odbywa się podsuszanie i wstępne podgrzewanie świeżo załadowanych surowych cegieł. Z komór powyższych powietrze o temp. 100—120°C odprowadza się do kanału dymowego, gdzie miesza się ono z oziębionymi gazami spalinowymi i razem z nimi odchodzi do komina.

Paliwo doprowadzane do komory VIII (nazywanej ogniową), przez otwory (czeluście) w sklepieniu pieca spala się w niej pomiędzy cegłami. Aby stworzyć lepsze warunki dla procesu spalania, cegły pod czeluściami układa się w odpowiedni sposób.

Gazy spalinowe opuszczają komorę ogniową w temperaturze wypalania, wynoszącej 900—1000°C lub w wyższej, w zależności od rodzaju wypalanych wyrobów. Przepływają one następnie przez komory przedogniowe pomiędzy znajdującymi się w nich cegłami, ogrzewają je i dostają się do komina poprzez otwarty kanał łączący komorę XIII z głównym kanałem dymowym.

Po pewnym czasie zależnie od szybkości przebiegu procesu wypalania (np. po upływie 12, 18 lub 24 godz), gdy cegły w komorze ogniowej zostaną wypalone, doprowadzanie paliwa do komory VIII przerywa się, natomiast zaczyna się zasilanie komory IX, która z kolei staje się komorą ogniową. Jednocześnie zamyka się kanał łączący komorę XIII z głównym kanałem dymowym, a gazy spalinowe po przepaleniu przegrody papierowej, oddzielającej komorę XIII od XIV, uchodzą do komina poprzez komorę XIV i otwarty kanał łączący ją z głównym kanałem dymowym.

Gdy ładowanie komory XVII jest ukończone, zamurowuje się jej furtę i wprowadza do niej (po oddzieleniu jej od komory XVIII papierową przegrodą) gorące powietrze do suszenia świeżej cegły. Następnie przystępuje się do ładowania opróżnionej w tym czasie komory XVIII. Jednocześnie odbija się furtę komory II, przez którą wchodzi teraz do pieca zimne powietrze, a wyładowuje się komorę I. Gdy wypalanie cegieł w komorze IX jest ukończone, ogień przenosi się do komory X itd.

W ten sposób co pewien okres czasu ogień przesuwa się z jednej komory do drugiej. W cegielniach czas ten wynosi zwykle od 12 do 24 godzin, zależnie od szybkości procesu wypalania i intensywności zasilania pieca paliwem.

W piecu kręgowym odbywa się dobra regeneracja ciepła zawartego w gazach spalinowych i w wypalonych wyrobach. Gazy spalinowe obniżają swoją temperaturę w komorach poogniowych do 100—200°C, a wypalone wyroby w komorach przedogniowych — do 50—100°C.

Stopniowe suszenie i podgrzewanie materiału przed właściwym procesem wypalania oraz stopniowe studzenie materiału wypalonego wpływa dodatnio na jakość wyrobów. Cegły, dachówki, sączki i inne wyroby z ceramiki czerwonej, wypalane w piecach kręgowych, dają mały stosunkowo procent braków wskutek pękania i paczenia.

Ze względu na równomierny przebieg procesu wypalania zasilanie komory ogniowej paliwem przez czeluście w sklepieniu pieca powinno się odbywać możliwie często, niewielkimi (od 1 do 3 kg) porcjami. Ponieważ w czasie zasilania przy obsłudze ręcznej czeluście są otwarte, gazy spalinowe wylatują często na zewnątrz, co działa szkodliwie na zdrowie palacza. Z tego powodu nowoczesne piece kręgowe są zaopatrywane

w mechaniczne zasilacze wprowadzające do pieca drobne paliwo małymi porcjami i w sposób równomierny. Wskutek tego zapotrzebowanie powietrza do spalania nie ulega wahaniom. Ustala się również ruch gazów i temperatury w piecu, a proces wypalania przebiega bardziej prawidłowo. Jeden z takich zasilaczy przedstawiono na rys. VI-7.

Zużycie paliwa umownego w piecach kręgowych jest znacznie mniejsze niż w piecach komorowych i wynosi przy wypalaniu cegły budowlanej od 3,7 do 4,0% ciężaru cegły, a przy wypalaniu wyrobów szamotowych — od 10 do 12%.

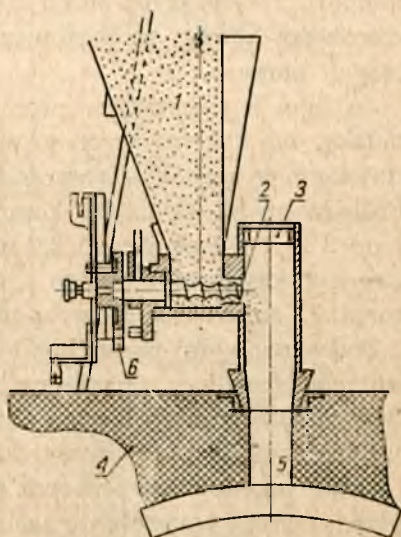
Sprawność pieców kręgowych wynosi od 15 do 30%. Największe straty ciepłne stanowią w nich straty kominowe wynoszące od 25 do 40%, ponieważ przez komin oprócz spalin uchodzi również powietrze zużyte do suszenia świeżych cegieł oraz powietrze, które dostaje się do pieca wskutek szczelności.

Piece kręgowe były dawniej stosowane do wypalania wapna. Otrzymywano z nich wapno w dużych kawałkach, prawie nie zawierające pyłu, którego w związku z obsuwaniem się materiału w piecach szybowych uniknąć nie można. Wskutek jednak znacznie większego niż w piecach szybowych zużycia paliwa i bardziej uciążliwej obsługi obecnie do wypalania wapna piece kręgowe nie są używane.

Zaletą pieców kręgowych jest możliwość wykorzystania w nich każdego rodzaju paliwa. Nadają się one do różnych gatunków węgla kamiennego i brunatnego oraz do paliwa gazowego.

Wadą ich jest nierównomierny rozkład temperatur w przekroju poprzecznym kanału i rozwarstwianie się gazów. Różnica temperatur pomiędzy górą i dołem pieca jest szczególnie duża w komorach poogniowych, gdzie czasami przekracza ona 300°C. Wskutek rozwarstwiania się gazów zimne powietrze, studząc wypalane wyroby, przepływa przez komory poogniowe przeważnie dołem, a gorące gazy spalinowe ogrzewające w komorach przedogniowych wyroby surowe — głównie górą. Wywiera to ujemny wpływ na pracę pieca, przedłuża czas przebywania w nim wyrobów i zmusza do budowy pieców dłuższych o większej ilości komór.

Piece wielokomorowe. Bardziej równomierny rozkład temperatur w komorach i znacznie słabsze rozwarstwienie gazów występuje



Rys. VI-7, Zasilacz mechaniczny:
1 — zbiornik paliwa, 2 — ślimak,
3 — wziernik, 4 — piec, 5 — cze-
luść, 6 — koło zębate

w piecach wielokomorowych. Poszczególne komory w tych piecach są oddzielone od siebie murowanymi ścianami, a nie papierowymi przegrodami jak w piecu kręgowym.

Przepływ gazów z jednej komory do drugiej odbywa się w piecach wielokomorowych albo przez otwory w dnie komory i kanały znajdujące się pod jej posadzką, albo przez kanały w ścianach rozdzielających komory w innych konstrukcjach.

Rozkład temperatur w piecach wielokomorowych z kanałami pod posadzką jest dostatecznie równomierny, ale konstrukcja pieców jest skomplikowana i remont kanałów dość trudny. Piece te są stosowane do wypalania wyrobów w temperaturach nie przekraczających 1250°C .

Do wypalania wyrobów dynasowych i magnezytowych, wymagających temperatur wyższych niż 1250°C (ok. 1500°C) i stosunkowo niewielkiej szerokości komór, są stosowane piece z kanałami w ścianach rozdzielających komory.

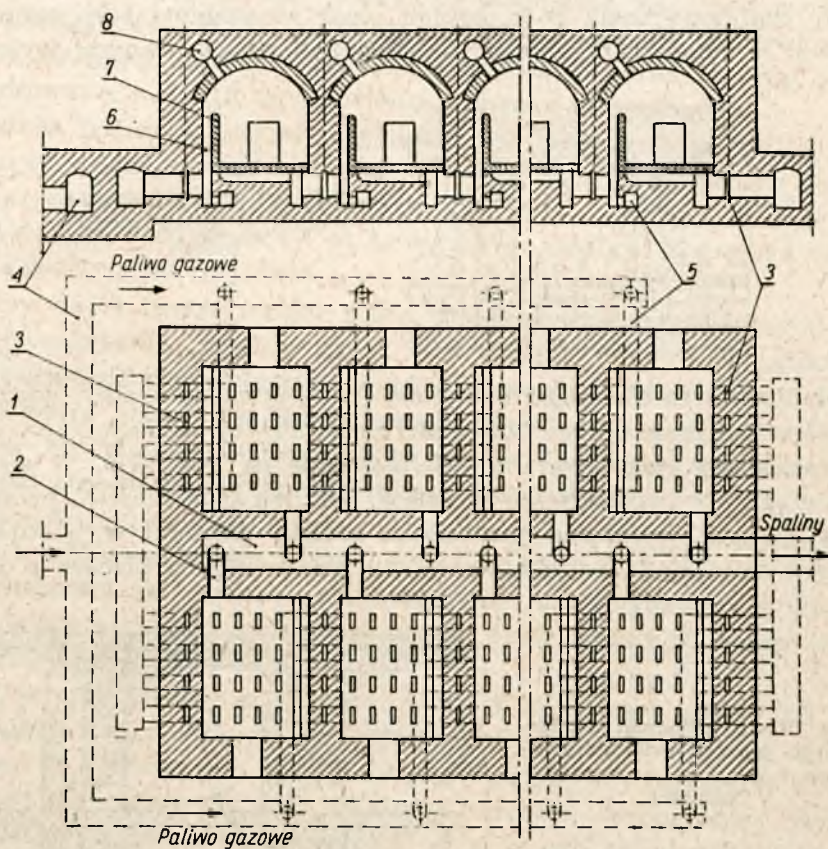
Jednym z pierwszych pieców wielokomorowych z kanałami pod posadzką, na którym wzorowano konstrukcję innych pieców, jest przedstawiony w sposób uproszczony na rys. VI-8 piec systemu Mendheima. Posiada on od 12 do 24 komór o długości od 4 do 6 m, szerokości od 2 do 3 m i wysokości od 2,2 do 3 m. Komory te są umieszczone po obu stronach kanału dymowego 1, z którym każda łączy się za pośrednictwem kanału 2 zamykanego dzwonem, podobnie jak w piecu kręgowym.

Pod ażurowymi posadzkami komór znajdują się kanały, którymi każda komora łączy się z następną wówczas, gdy jest podniesiona zasuwa 3. Opuszczając zasuwy można przerwać połączenie między komorami. Normalnie podczas pracy wszystkie zasuwy zarówno komory ogniowej, jak i komór przedogniowych oraz poogniowych są podniesione. Wyłączone są z ruchu przez opuszczenie zasuw tylko te komory, w których odbywa się ładowanie i wyładowywanie materiału.

Piec Mendheima, podobnie jak inne piece wielokomorowe, jest ogrzewany paliwem gazowym. Paliwo, najczęściej gaz generatorowy, doprowadza się do każdej komory z kanału 4 znajdującego się na zewnątrz pieca za pośrednictwem przewodu 5, który jest zaopatrzony w odpowiednie zamknięcie do uruchamiania i przerywania przepływu paliwa.

Powietrze dostaje się do pieca przez otwartą furtę komory, która sąsiaduje z komorą wyładowywaną, studzi w niej wyroby i przepływa kanałami pod posadzką do komory następnej, gdzie dalej się ogrzewa. Z komory tej powietrze przedostaje się, również przez otwory w posadzce i kanały pod nią, do komory następnej i, przepływając podobnie z komory do komory, studzi wyroby w komorach poogniowych. Przy wejściu do komory ogniowej powietrze ogrzane do kilkuset stopni Celsjusza spotyka się z paliwem gazowym, które dopływa przewodem 5, miesza się z nim i zapala się w dolnej części kanału pionowego 6. Palące się gazy kieruje ściana przewalowa 7 pod sklepienie pieca.

Gazy spalinowe, ogrzewając znajdujące się w komorze wyroby, obniżają swoją temperaturę, wskutek czego opadają na dół i kanałami pod posadzką przepływają do komory następnej, gdzie w dalszym ciągu stygnąc przekazują ciepło znajdującym się w niej wyrobom. Z komory tej w taki sam sposób przepływają one pod sklepienie komory sąsiedniej. Przepływając w podobny sposób z komory do komory gazy spalinowe



Rys. VI-8. Piec systemu Mendheima

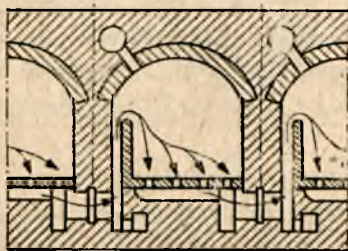
ogrzewają wyroby w komorach przedogniowych, a same stygną. Są one odprowadzane do komina zwykle z ostatniej, przedostatniej lub trzeciej od końca komory przedogniowej. W tym celu odpowiednia komora jest połączona za pomocą otwartego kanału 2 z głównym kanałem dymowym.

Gazy spalinowe zawierają dość dużo pary wodnej, która przy znacznym ich oziębieniu może osiąść w postaci rosy na zimnych wyrobach znajdujących się w świeżo włączonej do obiegu ostatniej komory przedogniowej, co wpłynęłoby ujemnie na jakość wyrobów.

Aby uniknąć skraplania się pary na wyrobach, w niektórych piecach wielokomorowych, podobnie jak w piecach kręgowych, stosuje się wstęp-

ne ogrzewanie wyrobów do temp. 70—100°C, połączone z jednoczesnym ich podsuszaniem. Podsuszenie odbywa się w jednej lub w dwóch ostatnich komorach przedogniowych za pomocą gorącego powietrza pobieranego z odpowiedniej komory poogniowej. W tym celu piece wielokomorowe posiadają specjalne kanały (w rozpatrywanym piecu Mendheima kanał 8). Kanałami tymi gorące powietrze przepływa z komory, z której jest pobierane, do komór, w których odbywa się podsuszanie.

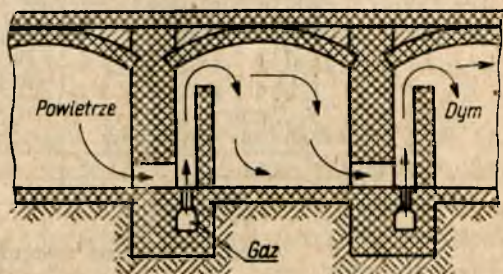
Gazy spalinowe mają w komorach pieca Mendheima bieg naturalny, ponieważ w miarę ostygnięcia opadają pomiędzy ogrzewanymi wyrobami



Rys. VI-9. Schemat studzenia w piecu Mendheima

na dół. Powietrze chłodzące natomiast ma bieg nienaturalny, gdyż jako zimniejsze opada na dół wzdłuż ściany przewałowej bezpośrednio po wejściu do komory, jak pokazano schematycznie na rys. VI-9. W górnych częściach komór poogniowych powstają wskutek tego martwe przestrzenie, w których wyroby stygną bardzo wolno. Warunki więc studzenia wyrobów w piecu Mendheima, podobnie jak w innych piecach z odpro-

Rys. VI-10. Schemat studzenia w piecach wielokomorowych z kanałami w bocznych ścianach



wadzaniem gazów przez posadzkę, nie są prawidłowe. Zmusza to do przedłużania czasu studzenia, co wpływa na zmniejszenie wydajności pieca.

Bardziej prawidłowy kierunek ruchu, zbliżony do kierunku naturalnego, posiada powietrze studzące wyroby w piecach wielokomorowych, w których gazy przepływają z jednej komory do drugiej przez kanały w ścianach pomiędzy komorami. Schemat takiego pieca jest przedstawiony na rys. VI-10. W piecu tym ściany przewałowe są wysokie, wskutek czego przestrzeń o powolnym studzeniu jest znacznie mniejsza. Jest to przestrzeń w komorach poogniowych pod ich sklepieniem powyżej ścian przewałowych.

Inż. Adamiecki, późniejszy profesor Politechniki Warszawskiej, ulepszył przed pierwszą wojną światową konstrukcję pieców wielokomorowych, odprowadzając powietrze chłodzące wyroby spod sklepienia komory i wprowadzając je pionowymi kanałami w ścianach do następnej komory od dołu. Martwa przestrzeń w czasie studzenia zmniejszyła się wskutek tego w piecu jego konstrukcji prawie do zera. Piec Adamieckiego posiadał jednak dużo zasuw, co utrudniało jego obsługę. W kilka lat później prof. W. E. Grum-Grzymajło udoskonalił konstrukcję tego pieca, usuwając zasuwę. Obecnie piece W. E. Grum-Grzymajły znajdują zastosowanie w ZSRR do wypalania wyrobów ceramicznych.

Liczba komór w piecach wielokomorowych wynosi od 16 do 32, pojemność jednej komory waha się od 14 m³ w małych piecach do 40 m³ w dużych piecach. Wysokość komór wynosi od 2 do 3 m, długość ich — od 4 do 6 m, a szerokość — od 2,5 do 4,5 m. Grubość zewnętrznych ścian pieca dochodzi do 1—1,25 m.

Przy dużej liczbie komór piece wielokomorowe, podobnie jak piece kręgowe, pracują „na dwa ognie”, tj. wypalanie odbywa się jednocześnie w dwóch daleko odległych od siebie komorach. Każda z tych komór posiada przed sobą kilka komór przedogniowych, a poza sobą — kilka komór poogniowych. Obie komory ogniowe postępują jedna za drugą, kolejno przechodząc przez wszystkie komory pieca.

Opór, który stawiają komory przepływającym gazom, wynosi w piecach z odprowadzaniem gazów przez posadzkę od 1,5 do 2,5 mm H₂O, w zależności od gęstości ustawiania w nich wypalanych wyrobów, a w piecach z odprowadzaniem gazów przez kanały w bocznych ścianach — od 0,6 do 1,2 mm H₂O.

Wydajność pieców wielokomorowych i kręgowych zależy od czasu, w ciągu którego odbywa się wypalanie wyrobów w komorze ogniowej. Im jest on krótszy, tym wydajność jest większa. Aby wypalanie wyrobów w komorze ogniowej było możliwie krótkie, temperatura wyrobów w ostatniej komorze przedogniowej — w chwili rozpoczęcia w niej palenia (tj. w momencie, gdy staje się ona komorą ogniową) — powinna być zbliżona do temperatury wypalania. Można to łatwiej osiągnąć w przypadku, gdy ilość komór, w których zachodzi podgrzewanie wyrobów (czyli komór przedogniowych), jest dostatecznie duża. Ponieważ ilość komór strefy przedogniowej w piecach wielokomorowych z odprowadzaniem gazów przez kanały w bocznych ścianach dochodzi do 7, a w komorach z odprowadzeniem gazów przez posadzkę nie przekracza 5, gdyż opór tych komór jest większy, wydajność pieców wielokomorowych z kanałami pod posadzką jest o 25—30% mniejsza od wydajności pieców z kanałami w ścianach.

Zużycie paliwa w przeliczeniu na paliwo umowne w piecach wielokomorowych zależy od rodzaju wypalanych wyrobów i dla wyrobów

szamotowych wynosi od 10 do 12% ich ciężaru, dla wyrobów dynasowych — od 15 do 20%, a dla rur kanalizacyjnych — od 18 do 22%. Zwykle w piecach z odprowadzaniem gazów przez posadzkę zużycie paliwa jest większe (ponieważ traci się w nich sporo ciepła na ogrzewanie kanałów pod posadzką) niż w piecach z odprowadzaniem gazów przez kanały w bocznych ścianach.

PIECE TUNELOWE

1. Wiadomości wstępne

Piece tunelowe znalazły szerokie zastosowanie do wypalania cegły ogniotrwałej i budowlanej, rur kamionkowych, wyrobów fajansowych oraz porcelanowych i innych wyrobów ceramicznych. Poza przemysłem ceramicznym spotyka się je rzadko np. w przemyśle metalowym do termochemicznej obróbki stali i żeliwa kowalnego (ciągliwego).

Nowoczesne piece tunelowe w porównaniu z innymi piecami ceramicznymi są obecnie uważane za najbardziej doskonałe urządzenia do wypalania różnego rodzaju wyrobów ceramicznych.

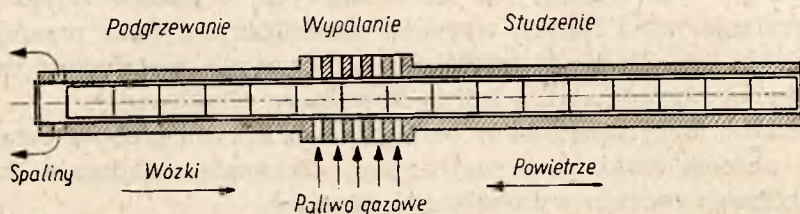
Głównymi zaletami są: 1) stosunkowo małe zużycie paliwa i w związku z tym większa niż w innych piecach ceramicznych sprawność, 2) możliwość pracy bez żadnych przerw i remontów przez dłuższy okres czasu (2—3 lat), 3) bardziej higieniczne, proste i mniej wyczerpujące fizycznie obsługiwanie, 4) możliwość stosowania całkowitej automatyzacji procesu wypalania. Do najważniejszych wad pieców tunelowych zalicza się duże koszty inwestycyjne i znacznie większe niż w innych piecach ceramicznych zużycie stali. Szczególnie kosztowny i wymagający dużo metalu jest tabor wózków, których w samym piecu mieści się — zależnie od jego wielkości — od 20 do 60 sztuk, nie licząc dużej liczby wózków poza piecem.

W piecach tunelowych ruch powietrza i gazów spalinowych zachodzi w kierunku przeciwnym niż ruch wypalanych wyrobów. Wewnątrz długiego, wąskiego tunelu poruszają się w sposób ciągły lub w regularnych, krótkich odstępach czasu przylegające do siebie wózki załadowane ułożonymi w odpowiedni sposób wyrobami. W przeciwnym kierunku przepływa przez tunel pomiędzy wyrobami strumień powietrza i gazów spalinowych.

Tunel (rys. VII-1) jest to kanał o długości od 40 do 160 m, w którym są ułożone szyny w celu łatwiejszego poruszania się wózków. Szerokość tuneli w świetle waha się w granicach od 1,5 do 3 m, wysokość zaś — licząc od główki szyny do najwyższego punktu sklepienia — od 1,5 do 2,8 m.

W klasycznym piecu tunelowym, podobnie jak w piecach kręgowych i wielokomorowych, rozróżnia się strefy podgrzewania, wypalania i studzenia. Wypalane wyroby wprowadzane do pieca (rys. VII-1) na wózkach w miarę posuwania się w głąb tunelu spotykają w strefie podgrzewania coraz gorętsze gazy, ogrzewają się i wchodzą do strefy wypalania o temperaturze kilkuset stopni Celsjusza. W strefie tej, wskutek panującej tam wysokiej temperatury, odbywa się proces wypalania i w materiale wyrobów zachodzą właściwe przemiany charakterystyczne dla tego procesu. Po przejściu przez strefę wypalania wózki z wyrobami wchodzą do strefy studzenia i w miarę posuwania się dalej stykają się z coraz zimniejszym powietrzem, ogrzewają go, a same stygną i opuszczają piec, mając stosunkowo niską temperaturę.

Powietrze wchodzi do pieca (rys. VII-1) z przeciwnego niż wózki końca tunelu i poruszając się w przeciwnym kierunku do wózków, oziębia w strefie



Rys. VII-1. Schemat pieca tunelowego

studzenia wypalane wyroby podnosząc w ten sposób swoją temperaturę. W strefie wypalania spotyka się powietrze z paliwem, wskutek czego zachodzi proces spalania. Gazy spalinowe, płynąc następnie przez strefę podgrzewania, podnoszą temperaturę wyrobów surowych, a same stygną i opuszczają tunel.

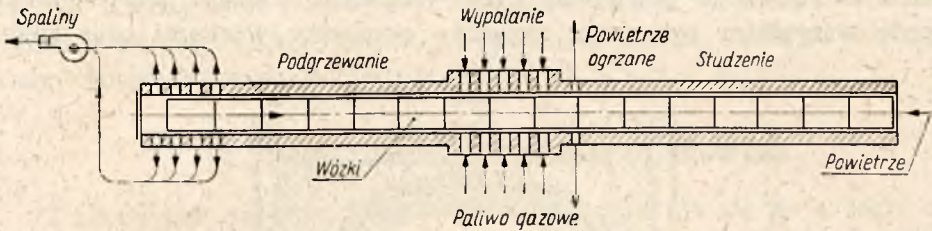
Wadą pieców działających według omówionego schematu (rys. VII-1) jest spalanie paliwa przy zbyt dużym nadmiarze powietrza, ponieważ do studzenia wypalonych wyrobów potrzeba znacznie więcej powietrza niż do spalania paliwa. Inną wadą tych pieców jest rozwarstwianie się przepływających przez tunel gazów. Pod sklepieniem tunelu zawsze przepływają gazy o wyższej temperaturze, na dole zaś — bliżej pomostu wózków — gazy zimniejsze. Różnica temperatur pomiędzy górą i dołem tunelu jest szczególnie duża w strefie podgrzewania.

W celu zmniejszenia nadmiaru powietrza w strefie wypalania część gorącego powietrza odprowadza się ze strefy studzenia na zewnątrz i zużywa do ogrzewania (np. do ogrzewania pomieszczeń) lub do suszenia (np. do suszenia surowych wyrobów).

Dla utrudnienia rozwarstwiania się gazów w tunelu wyroby układa się na wózkach w taki sposób, aby gazy miały do pokonania na dole mniejsze opory niż na górze. Poza tym odprowadza się z tunelu gazy spalinowe

nie z jednego, lecz z kilku jego miejsc, jak pokazano schematycznie na rys. VII-2. Według schematu przedstawionego na powyższym rysunku pracuje wiele pieców do wypalania cegły zwykłej i ogniotrwałej.

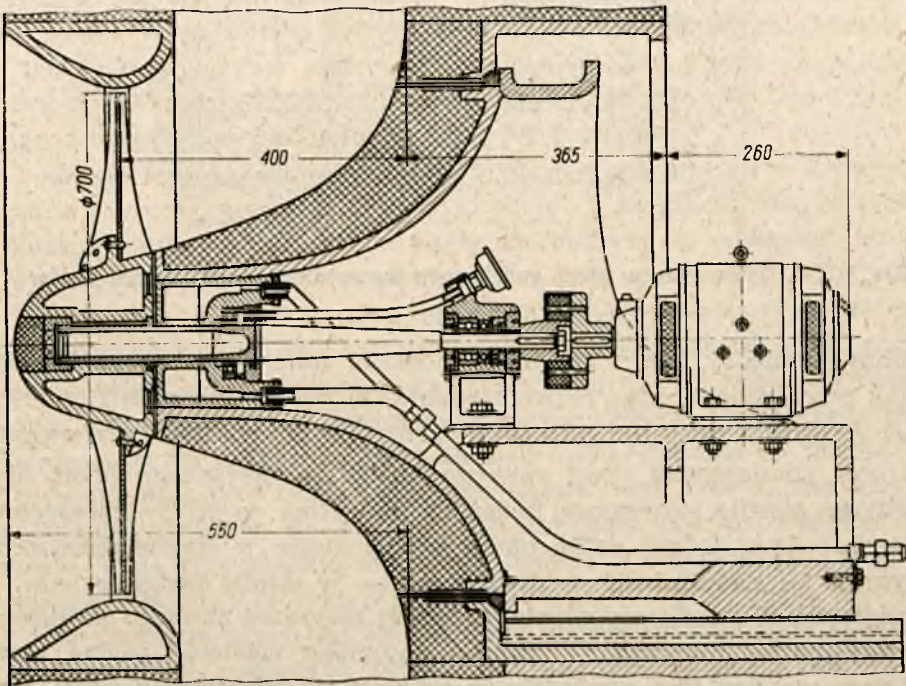
W niektórych przypadkach w celu lepszego wyrównania temperatury w przekroju poprzecznym tunelu i powiększenia przez to szybkości podgrzewania leżących na dole wyrobów stosuje się recyrkulację gazów



Rys. VII-2. Schemat pieca tunelowego z ciągiem sztucznym

spalinowych w strefie podgrzewania, albo doprowadza się na początku strefy podgrzewania gorące powietrze ze strefy chłodzenia.

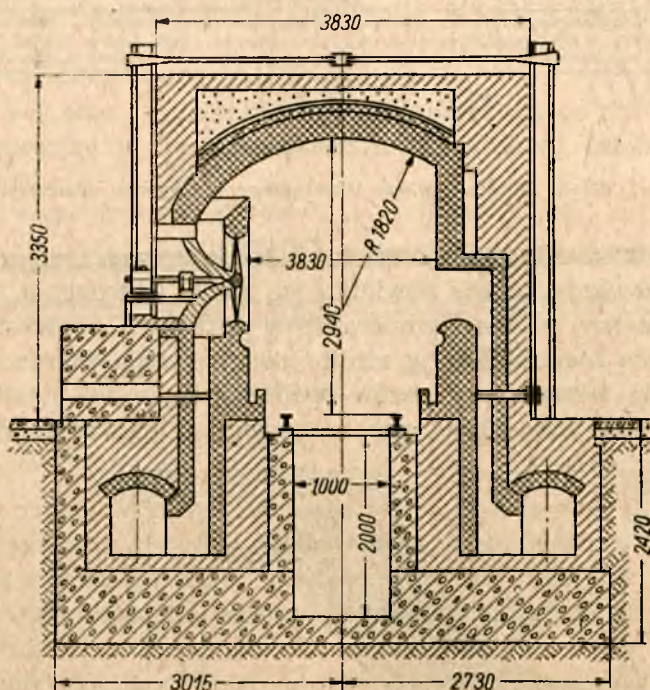
Nierównomierny rozkład temperatur w przekroju poprzecznym pieca jest szczególnie niepożądany w strefie podgrzewania. Bardzo skutecznie wyrównuje się temperatury gazów spalinowych w tej strefie, gdy nie przekraczają one $750-800^{\circ}\text{C}$, przez energiczne mieszanie. W tym celu



Rys. VII-3. Ogniodporny wentylator do mieszania gorących gazów w piecu tunelowym

ustawia się wzdłuż tunelu w odległości 5—6 m od siebie specjalne wentylatory. Konstrukcja jednego z takich wentylatorów jest przedstawiona na rys. VII-3, a sposób jego ustawienia — na rys. VII-4.

Wadą pieców tunelowych jest konieczność wytworzenia w nich dość dużego rozrzedzenia w celu ułatwienia przepływu przez długi tunel powietrza i gazom spalinowym. Pociąga to za sobą przedostawanie się do tunelu zimniejszego powietrza przez wszelkiego rodzaju nieszczelności, przede wszystkim zaś przez szczeliny pomiędzy wózkami oraz przez



Rys. VII-4. Ustawienie w piecu tunelowym wentylatora do mieszania gazów

szczeliny pomiędzy nimi i bocznymi ścianami tunelu. Powietrze to oziębia dół pieca wzmacniając rozwarstwianie się gazów w tunelu i powiększając różnicę temperatur pomiędzy górnymi i dolnymi ich warstwami.

W celu zmniejszenia ilości zimnego powietrza zasysanego przez nieszczelności stosuje się czasami tłoczenie powietrza do strefy chłodzenia. Wskutek tego w jednej części pieca, a mianowicie w strefie chłodzenia utrzymuje się nadciśnienie, w drugiej zaś — w strefie podgrzewania — podciśnienie. W strefie wypalania, w której zasysanie zimnego powietrza jest najbardziej niepożądane, panuje natomiast ciśnienie równe zeru, czyli jest ona pod tym względem w warunkach korzystnych. Poza tym największe rozrzedzenie w miejscu odprowadzania z tunelu gazów spa-

linowych jest w tym przypadku znacznie mniejsze niż w piecach bez tłoczenia powietrza, wskutek czego mniejsze jest również zasysanie zimnego powietrza do strefy podgrzewania.

Prędkość przepływu gazów w tunelu, ze względu na tendencję ich rozwarstwiania się, powinna być możliwie duża, większa niż 1—1,5 m/sek. Zwiększenie prędkości przepływu gazów osiąga się w piecach tunelowych przez gęściejsze układanie wypalanych wyrobów, w ten sposób zmniejszając między nimi swobodne przejścia dla gazów. W piecach, w których stosuje się recyrkulację gazów, prędkości ich przepływu są zwykle znacznie większe niż w piecach bez recyrkulacji.

2. Części składowe pieców tunelowych

T u n e l jest najważniejszą częścią pieca. Muruje się go z cegły zwykłej, ogniotrwałej i lekkiej izolacyjnej (z ziemi okrzemkowej). Wybór materiału dla różnych części pieca zależy od temperatur, które w nich panują.

Części pieca stanowiące strefy ogrzewania i studzenia wykonuje się najczęściej z cegły szamotowej i zwykłej. Do murowania ścian pieca w strefie wypalania stosuje się natomiast cegłę dynasową, magnezytową i dobrego gatunku cegłę szamotową. W celu zmniejszenia strat ciepłych ściany i sklepienie tunelu wykłada się z zewnątrz cegłą izolacyjną lub izoluje się innymi materiałami. Z tego samego powodu ściany pieca w strefie wypalania są zwykle grubsze niż w pozostałych strefach.

Prawidłowy wybór materiałów na poszczególne części pieca oraz bardzo staranne jego wykonanie są warunkiem długiej (od 2 do 3 lat) pracy pieca tunelowego bez żadnych przerw i remontów.

Boczne ściany i sklepienie tunelu w celu ułatwienia odkształceń termicznych powinny mieć szwy dylatacyjne o szerokości ok. 25 mm. Wykonuje się je w ścianach z cegły szamotowej w odstępach co 10 m, a z cegły dynasowej — w odstępach co 3—4 m.

Sklepienia pieców tunelowych bywają albo łukowe (rys. VII-7), albo płaskie (rys. VII-8). W przypadku sklepień łukowych odległość pomiędzy sklepieniem a górną powierzchnią załadowanych na wózki wyrobów jest dość duża, szczególnie pośrodku przekroju poprzecznego pieca. Jest to wadą sklepień łukowych, gdyż ułatwia rozwarstwianie się gazów i przepływ ich poza wyrobami pod samym sklepieniem tunelu. Znacznie lepsze pod tym względem są sklepienia płaskie, przy których odległość ta jest mała. Poza tym płaskie sklepienia pozwalają na większy (do 10%) załadunek tunelu surowymi wyrobami.

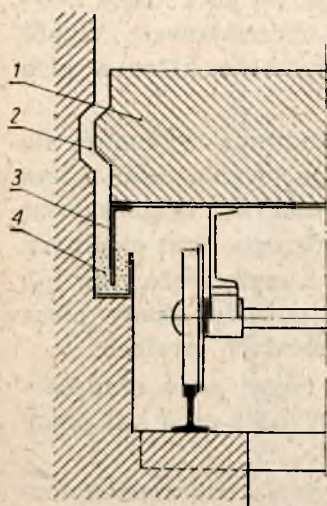
Na zewnątrz tunel jest wzmocniony szkieletem stalowym składającym się zwykle z poziomych belek ceowych, umieszczonych na wysokości wezłowia (stopy) sklepienia, i belek pionowych najczęściej dwuteowych,

rozstawionych wzdłuż tunelu w odległości 1,5—2 m od siebie symetrycznie po obu jego stronach. Przeciwległe belki pionowe są związane ze sobą stalowymi prętami (ankrami).

Rozstawienie szyn, po których toczą się wózki w tunelu, wynosi zależnie od jego szerokości od 600 do 1200 mm. Szyny powinny być silnie przymocowane do stalowych podkładów spoczywających na fundamencie pieca, ponieważ podczas ruchu wózków mogą działać na nie duże siły boczne.

Pomiędzy szynami w fundamencie wzdłuż całej długości pieca znajduje się kanał (rys. VII-7), przez który dokonuje się studzenia, obserwacji i obsługi (np. smarowania łożysk) podwozia wózków.

W celu hermetycznego oddzielenia tunelu od kanału obserwacyjnego w piecach tunelowych stosuje się zamknięcia piaskowe (rys. VII-5). Drobny, dobrze odsiany piasek znajduje się w rynnach biegnących wzdłuż tunelu po obu jego stronach nieco powyżej główek szyn. W piasku tym są zanurzone na głębokość od 100 do 150 mm fartuchy z blachy stalowej, przymocowane do podłużnych boków ramy wózków.



Rys. VII-5. Schemat uszczelnienia piaskowego: 1 — wózek, 2 — uszczelnienie labiryntowe, 3 — fartuch, 4 — rynna z piaskiem

Zamknięcie piaskowe nie spełnia jednak całkowicie swego zadania, ponieważ piasek częściowo jest wydmuchiwany z rynny, a częściowo przesuwa się w niej w kierunku ruchu wózków. Pomimo uzupełniania — w miarę potrzeby — jego ilości przez specjalne otwory w ścianach tunelu szczelność często bywa naruszana, wobec czego w strefie wypalania gazy spalinowe przedostają się pomimo uszczelnienia piaskowego do dolnego kanału, a w strefie podgrzewania jest zasysane z kanału do tunelu zimniejsze powietrze. Dla zwiększenia szczelności

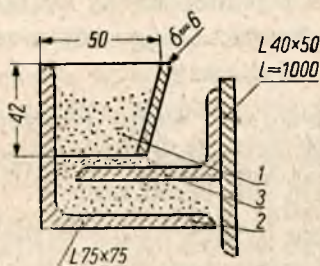
między tunelem i kanałem stosuje się dodatkowo uszczelnienie labiryntowe pomiędzy bocznymi ścianami tunelu i pomostem wózka. W tym celu ściany są zaopatrzone w odpowiednie wgłębienie (rys. VII-7), a pomosty — w dostosowane do nich występy. Szczelina w uszczelnieniu labiryntowym ma szerokość od 20 do 50 mm, rozszerzając się ku dołowi, aby ewentualne drobne odłamki materiałów ceramicznych mogły łatwo przez nią spaść do rynny z piaskiem, nie powodując tarcia pomiędzy wózkiem i ścianą tunelu.

Aby zapobiec przedostawaniu się do pieców nadmiernej ilości powietrza przy wprowadzaniu do nich nowych wózków, tunele posiadają przed

strefą podgrzewania wstępną komorę (przedsionek). Długość tej komory powinna być taka, aby mieściły się w niej dwa wózki. Czasami podobną komorę wykonuje się również i na drugim końcu pieca. Wstępne komory są zaopatrzone w dwoje szczelnych, podnoszonych do góry drzwi. Mechanizmy do podnoszenia tych drzwi są uzależnione od mechanizmu poruszającego wózki w taki sposób, że jedne z drzwi komory wstępnej są zawsze zamknięte, przez co tunel jest oddzielony od powietrza zewnętrznego.

Wózki pieców tunelowych składają się ze stalowej ramy opierającej się za pomocą odpowiednich tulei na osiach z osadzonymi na nich kołami o średnicy rzędu 350 mm. W celu zabezpieczenia metalowych części wózka przed działaniem wysokich temperatur jego pomost jest wyłożony cegłą ogniotrwałą, przy czym w zależności od temperatury, w której za-

Rys. VII-6. Uszczelnienie piaskowe pomiędzy wózkami:
1 — zbiornik z piaskiem,
2 — półka, 3 — nóż



chodzi wypalanie wyrobów, górną warstwę obmurowania sporządza się z magnezytu, dynasu lub dobrego gatunku szamotu.

Grubość obmurowania wynosi zwykle 350—400 mm. W celu zmniejszenia ciężaru wózka oraz strat ciepłych do obmurowania jego pomostu stosuje się czasami lekką cegłę izolacyjną, albo specjalne ogniotrwałe pustaki.

Dla zapewnienia szczelności pomiędzy wózkami i bocznymi ścianami tunelu do wózków po obu ich bokach, jak już było zaznaczone, są przymocowane blachy stalowe, tzw. fartuchy, które na całej długości wózka powinny być równomiernie zanurzone w piasku. Szczelność pomiędzy wózkami w miejscach ich styku ze sobą osiąga się za pomocą uszczelnienia labiryntowego albo piaskowego. Przy uszczelnieniu labiryntowym dla uzyskania większej szczelności wkłada się w szczelinę pomiędzy tyłem poprzedniego a przodem następnego wózka długie wałki, o odpowiedniej grubości, z surowej masy (gliny) szamotowej, lub sznur azbestowy, które przy przesuwaniu wózków są zgniatane i wypełniają wszelkie nieszczelności. Przy uszczelnieniu piaskowym w tyle poprzedniego wózka znajduje się zbiorniczek z półką, napełniony piaskiem, a na przodzie wózka

następnego — nóż, który wchodzi w warstwę piasku, jak przedstawiono na rys. VII-6.

Duże znaczenie dla szczelności trzonu pieca tunelowego mają wymiary wózków. Im wózki są dłuższe, tym jest ich mniej, a więc i mniej styków między nimi. Wózki dłuższe niż 3 m nie są jednak stosowane, ponieważ trudno osiągnąć przy większych wymiarach wystarczającą sztywność konstrukcji ich ram.

Wózki powinny posuwać się w piecu równo oraz lekko i dlatego koła ich są osadzone zwykle na łożyskach kulkowych lub rolkowych. Temperatura łożysk podczas przechodzenia wózków przez strefę wypalania dochodzi do 250°C i z tego powodu smary łożyskowe należy tak dobrać, aby one nie destylowały, wysychały lub znacznie zmieniały swoje własności w temperaturach niższych niż 300°C. Niektóre konstrukcje wózków przewidują chłodzenie łożysk w strefie wypalania prądem powietrza lub wodą. Koła z jednej strony wózka są gładkie, z drugiej zaś posiadają podwójne obrzeże. Osiąga się przez to równomierniejszy bieg wózków i mniejsze zużycie szyn.

P o p y c h a c z e. Wózki tworzące w tunelu długi pociąg najczęściej poruszane są za pomocą popychaczy znajdujących się zwykle obok przedśionka tunelu lub przed nim.

Popychacze bywają hydrauliczne i mechaniczne. Posuwający się w cylindrze pod ciśnieniem cieczy tłok popychacza hydraulicznego przesuwa z przedśionka do tunelu wózek z surowymi wyrobami. Jednocześnie przesuwa się w piecu cały pociąg, wskutek czego z przeciwnego końca tunelu wychodzi wózek z wyrobami wypalonymi.

Popychacze hydrauliczne uruchamiają wózki oraz cały pociąg w sposób łagodny i bez wstrząsów. Gwałtowne ruszanie wózków z miejsca nie jest wskazane, gdyż może spowodować zawalenie się stosu ułożonych na nich wyrobów. Popychacze mechaniczne natomiast składające się ze śruby, napędu i reduktora posiadają znacznie krótszy czas rozruchu, a więc energiczniej ruszają z miejsca. Wymaga to staranniejszego układania wyrobów na wózkach. Z tego powodu w nowszych instalacjach pieców tunelowych są one stosowane coraz rzadziej.

Ruch wózków w tunelu bywa okresowy lub ciągły. W pierwszym przypadku wózki poruszają się tylko przez 4—8 min, czyli przez okres czasu, potrzebny na wprowadzenie jednego wózka do tunelu, pozostały zaś czas są w spoczynku. Przy ruchu ciągłym wózki są w spoczynku bardzo krótko, najwyżej 5—10 min potrzebnych do dołączenia do pociągu wózka z wyrobami surowymi i wyciągnięcia z tunelu wózka z wyrobami wypalonymi. Prędkość przesuwania się wózków jest mała, zwykle mniejsza od 1 m/min.

3. Odmiany konstrukcyjne pieców tunelowych

Zasada działania wszystkich pieców tunelowych jest jednakowa. Różnią się jednak one od siebie szczegółami konstrukcyjnymi zależnie od rodzaju stosowanego paliwa, na którym pracują, oraz od rodzaju i własności wypalanych w nich wyrobów.

Piece tunelowe są ogrzewane paliwem stałym lub gazowym, a w krajach bogatych w ropę naftową również i paliwem ciekłym. Paliwo stałe spala się w nich albo bezpośrednio w tunelu pomiędzy wypalnymi wyrobami, jak w piecach kręgowych, albo w paleniskach zewnętrznych, półgazowych i o spalaniu zupełnym.

Przy spalaniu paliwa stałego w tunelu zasilanie pieca paliwem odbywa się przez czeluście w sklepieniu pieca podobnie jak w piecu kręgowym. Czeluście są rozmieszczone tylko w strefie wypalania w kilku rzędach po 2, 3 lub więcej czeluści w jednym rzędzie, zależnie od szerokości tunelu. Odległość między rzędami zależy od długości wózków i dobiera się ją w taki sposób, aby na jeden wózek przypadały 2 lub 3 rzędy, wobec czego odległość pomiędzy rzędami wynosi ok. 1 m.

Paliwo jest doprowadzane przez czeluście w sposób ciągły za pomocą zasilaczy mechanicznych (rys. VI-7) omówionych w poprzednim rozdziale. Zasilanie ręczne w piecach tunelowych obecnie nie jest stosowane.

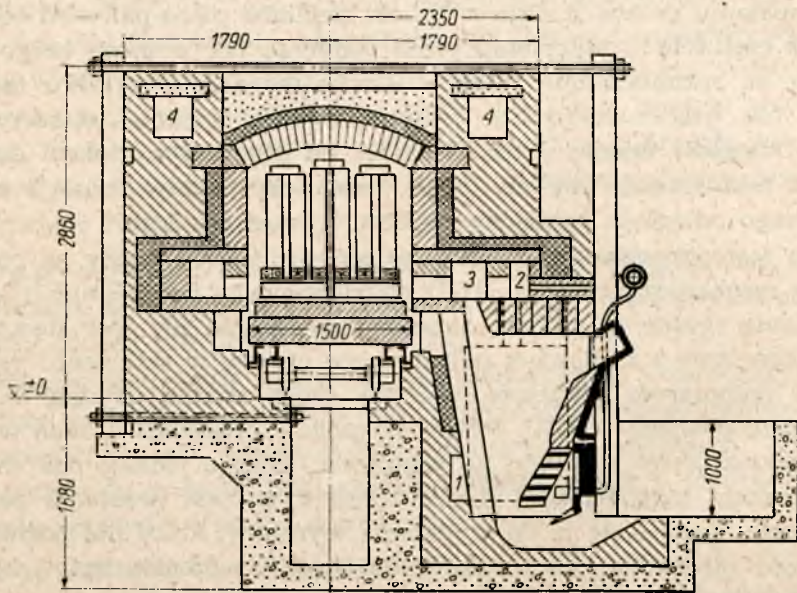
Piece tunelowe z zasilaniem paliwa przez otwory w sklepieniu pracują z dużym nadmiarem powietrza, wskutek czego trudno uzyskać w nich temperaturę powyżej 1000°C. Proces wypalania przebiega w nich w sposób nierównomierny i trudno go regulować. Biorąc jednak pod uwagę, że konstrukcja tego rodzaju pieców tunelowych jest prosta, a zużycie paliwa małe, stosuje się je do wypalania wyrobów, które nie potrzebują silniejszego spieczenia, jak cegła budowlana, dachówka itp., i wobec tego nie wymagają stosowania wysokich temperatur.

Do spalania paliwa stałego w paleniskach zewnętrznych można stosować paleniska dowolnej konstrukcji. Na rys. VII-7 jest przedstawiony przekrój przez strefę wypalania pieca tunelowego zaopatrzonego w palenisko z rusztem schodkowym. Gazy spalinowe dostają się z paleniska do kanałów 3 w bocznych ścianach pieca. Kanały te są połączone z tunelem szeregiem otworów. W ten sposób przy małej liczbie palenisk można doprowadzać do tunelu gorące gazy spalinowe na dłuższym odcinku strefy wypalania, co jest pożądane, ponieważ przy doprowadzeniu produktów spalania w jednym miejscu może tam nastąpić gwałtowny wzrost temperatury.

Przy paleniskach zewnętrznych temperatura wypalania w piecach tunelowych osiąga wysokość 1100—1200°C. Warunki wypalania jednak nie są stałe. Zmieniają się pomiędzy jednym a drugim załadunkiem paliwa, co znacznie utrudnia lub nawet uniemożliwia uzyskanie w piecach tunelowych na paliwo stałe produkcji jednorodnej. Uwzględniając przy tym,

ze przy spalaniu paliwa stałego (nawet w paleniskach zewnętrznych) uzyskuje się wyroby zanieczyszczone popiołem i żużlem, łatwo można zrozumieć, dlaczego piece tunelowe na paliwo stałe są obecnie stosowane do wypalania tylko takich wyrobów, którym nierównomierny bieg procesu wypalania niewiele szkodzi, a więc do wypalania cegły budowlanej, dachówki, fajansowych wyrobów gospodarczych w kapslach itp. Paliwo stałe stosuje się również i w tunelowych piecach muflowych przy niewysokich temperaturach wypalania.

Znacznie bardziej niż paliwo stałe nadaje się do pieców tunelowych paliwo gazowe (gaz ziemny, generatorowy itp.). Spala się ono albo bez-



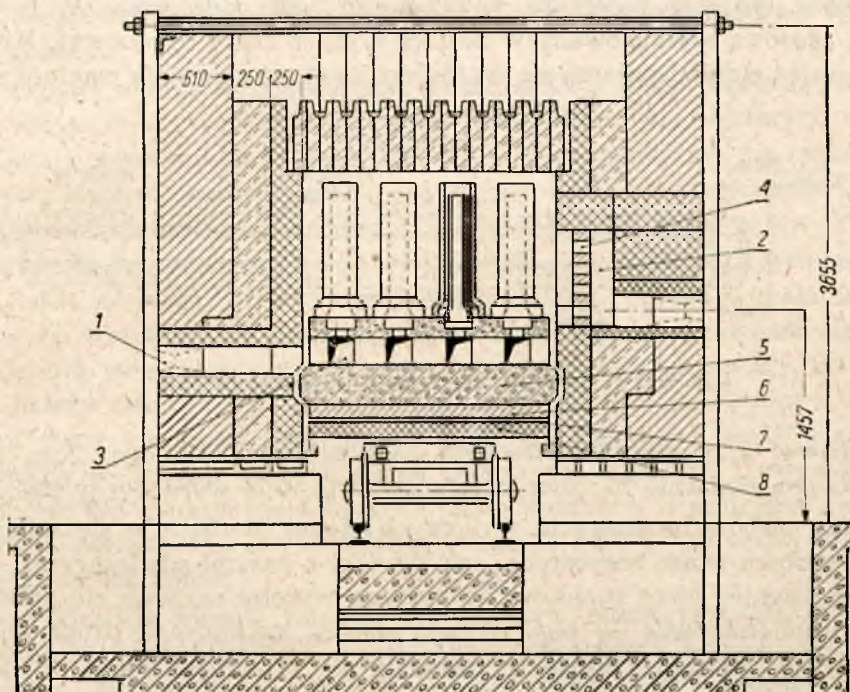
Rys. VII-7. Przekrój przez strefę wypalania pieca tunelowego z paleniskiem schodkowym: 1 — kanał powietrzny, 2 — powietrze wtórne, 3 — kanał powietrzno-gazowy, 4 — przewód do gorącego powietrza

pośrednio w tunelu pieca, albo w specjalnych komorach paleniskowych. W pierwszym przypadku paliwo gazowe doprowadza się do tunelu możliwie nisko przez boczne ściany strefy wypalania za pomocą odpowiednich palników. Paliwo ulega spalaniu mieszając się z gorącym, ogrzanym w strefie chłodzenia powietrzem.

Paleniska do paliw gazowych w piecach tunelowych bywają o spalaniu zupełnym i niezupełnym. Paleniska o spalaniu zupełnym, nazywane paleniskami komorowymi, stosuje się w przypadku, gdy temperatura wypalanych wyrobów jest niska, wskutek czego nie można prowadzić spalania wewnątrz tunelu ze względu na niebezpieczeństwo możliwego gaśnięcia płomienia. Stosuje się je również i w tych przypadkach, gdy wypalone wyroby należy chronić od bezpośredniego stykania się z ogniem

lub gdy należy zmienić atmosferę redukującą w piecu na utleniającą, albo gdy trzeba za pomocą zawierających tlen produktów zupełnego spalania paliwa w palenisku dopalić gazy znajdujące się w strefie wypalania.

Paleniska o spalaniu niezupełnym, zwane szczelinowymi, są stosowane w przypadku, gdy chodzi o wyrównanie temperatur w przekroju pieca, albo w celu wykorzystania gorącego powietrza dopływającego ze strefy chłodzenia lub przez nieszczelności. Paleniska powyższe rozmieszcza się



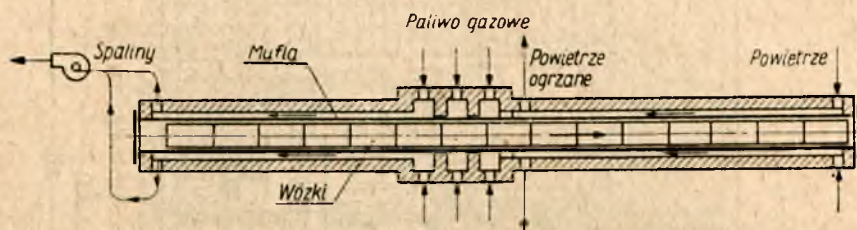
Rys. VII-8. Przekrój przez strefę wypalania pieca tunelowego do wypalania rur: 1 — palnik szczelinowy, 2 — palenisko komorowe, 3 — kanały w obmurowaniu wózka, 4 — krata z cegły dynasowej, 5 — obmurowanie wózka, 6 — ogniotrwała cegła izolacyjna, 7 — podkładka azbestowa, 8 — cegła specjalna

ze względu na umożliwienie rozwinięcia się płomienia w taki sposób, aby wylatujące z nich gazy trafiały do przestrzeni niewypełnionej wyrobami, np. w odstępach między nimi na sąsiednich wózkach. Możliwe to jest tylko przy przerywanym ruchu wózków. Wylot gazów z tego rodzaju palenisk może być skierowany również i do kanałów znajdujących się w obmurowaniu pomostu wózka (rys. VII-8). W kanałach tych kończy się proces spalania gazu, a że są one rozmieszczone w płaszczyźnie wózka dość równomiernie, ogrzewanie wyrobów w całej objętości strefy wypalania jest również równomierne.

Na rys. VII-8 jest przedstawiony przekrój poprzeczny strefy wypalania pieca tunelowego do wypalania rur kamionkowych. Rury są ustawione

na wózkach w pozycji pionowej, przy czym rury o mniejszej średnicy znajdują się wewnątrz rur o większych średnicach. Piec jest ogrzewany gazem generatorowym, którego ciśnienie przed paleniskiem wynosi 80 mm H₂O. Doprowadza się go przez palniki szczelinowe znajdujące się po obu stronach tunelu po 30 z każdej strony, średnio przypada po 6 palników na 1 wózek. Połowa palników kieruje płomień do kanałów w obmurowaniu pomostu wózków, pozostałe zaś palniki — poprzez paleniska komorowe — do ogrzewania rur z zewnątrz.

Komorą spalania paleniska komorowego jest oddzielona od tunelu ścianą ażurową wymurowaną w postaci kraty z cegły dynasowej. Krata, akumulując ciepło, rozżarza się do białego żaru, co zapewnia ciągłość spa-



Rys. VII-9. Schemat muflowego pieca tunelowego

lania nawet przy nierównomiernym dopływie gazu palnego. Poza tym wpływa ona dodatnio na równomierność wypalania wyrobów w piecu.

Oprócz pieców tunelowych, w których ciepło przekazuje się wypalonym wyrobom przez bezpośredni ich kontakt z gazami spalinowymi, stosuje się również piece tunelowe, w których wyroby ogrzewa się głównie przez promieniowanie. W tego rodzaju piecach znajduje się długa mufla (rys. VII-9), wewnątrz której przesuwają się z jednego końca w drugi wypalane wyroby. Nie mają one kontaktu z gazami spalinowymi i otrzymują ciepło wskutek promieniowania rozżarzonych ścian mufla i częściowo wskutek naturalnej, lub rzadziej, wymuszonej cyrkulacji znajdującego się w niej powietrza.

Goście gazy spalinowe opływają muflę na zewnątrz, przekazując jej ciepło w strefie podgrzewania i wypalania. Ruch ich odbywa się najczęściej pod działaniem wentylatora wyciągowego (rys. VII-9). Powietrze chłodzące muflę w strefie chłodzenia jest zużywane do celów grzejących i suszarniczych poza piecem.

Muflowe piece tunelowe stosuje się w tych przypadkach, gdy produkty spalania zawierają niespalone, twarde cząstki, popiół itp., działające szkodliwie na wypalane wyroby, oraz wtedy, gdy trzeba wyroby zabezpieczyć przed szkodliwym działaniem gazów spalinowych (np. przy wypalaniu dekoracyjnych wyrobów porcelanowych lub przy termicznej obróbce metali).

Przekazywanie ciepła wypalanym wyrobom głównie przez promieniowanie rozżarzonych ścian mufl silnie ogranicza wymiary pieca. W muflach o przekroju powyżej $1 \times 1 \text{ m}^2$ uzyskuje się bardzo nierównomierny rozkład temperatur i dlatego wymiary ich są zwykle mniejsze.

Mufle pieców tunelowych są wykonywane z materiałów wykazujących dobre przewodnictwo właściwe i dużą odporność na działanie wysokich temperatur, jak karborund i korund. Ze względu jednak na dość wysoką cenę tych materiałów spotyka się również mufle szamotowe, a przy niskiej temperaturze wypalania — mufle z ogniotrwałego żeliwa i ogniotrwałej stali.

Po drugiej wojnie światowej zjawily się w USA piece tunelowe, o dużej wydajności, do wypalania wyrobów cienkościennych, w których tunel ma kształt pierścienia o średnicy 25—30 m. Piece powyższe nie posiadają wózków. Materiał surowy ładuje się bezpośrednio na pierścieniową posadzkę tunelu, obracającą się na rolkach z małą prędkością kątową i wyładowuje się już wypalony po pełnym prawie jej obrocie. Większa szczelność (brak wózków), większa możliwość regulacji procesu wypalania niż w piecach tunelowych normalnego typu oraz większa sprawność cieplna są zaletami pieca tego typu. Piec ten ma również pewne wady, do których należy zaliczyć zbyt małą przestrzeń w miejscu załadunku i wyładunku pieca, trudności jego umieszczenia w budynku i bardziej skomplikowany w pobliżu pieca schemat transportu surowych i wypalonych wyrobów. We Francji pierścieniowe piece tunelowe, o mniejszej jednak średnicy, zastosowano do wypalania w temp. 1410°C wyrobów porcelanowych ze szklivem.

Inną odmianę pieców tunelowych stanowią mikropiece. Są to piece tunelowe o bardzo krótkim tunelu, którego długość wynosi ok. 6 m, a przekrój poprzeczny — od 0,01 do 0,02 m^2 . Kształt i wymiary przekroju poprzecznego tunelu dobiera się w mikropiecach takiej wielkości, aby zmieściły się w przekroju poprzecznym jeden lub dwa wyroby. Mikropiece tunelowe nadają się wobec tego do wypalania jednakowych wyrobów o stosunkowo niewielkich wymiarach. Można w nich łatwo osiągnąć stałe warunki wypalania i dobrą wymianę ciepła. Prosta budowa, małe koszty inwestycyjne i duża wydajność upoważniają do zalecania mikropieców tunelowych do wypalania drobnych wyrobów wymagających zakończenia procesu wypalania w wąskich granicach końcowych temperatur.

4. Schemat obliczania pieców tunelowych

Obliczanie pieców tunelowych ma na celu ustalenie głównych wymiarów pieca i zużycia w nim paliwa na podstawie założonej wydajności i przyjętego procesu technologicznego wypalania wyrobów.

Oznaczając przez:

G — wydajność pieca w t/godz,

τ — czas przebywania wyrobów w piecu w godz,

F — przekrój poprzeczny tunelu w m^2 ,

g — gęstość wypełnienia tunelu wypalonymi wyrobami w t/m^3 ,

można obliczyć długość L pieca w m wg następującego wzoru:

$$L = \frac{G \cdot \tau}{F \cdot g} \text{ m} \quad [\text{VII-1}]$$

Czas przebywania wypalanych wyrobów w piecu τ zależy od różnych warunków technologicznych wypalania, a między innymi od materiału wyrobów i ich wymiarów. Składa się on zwykle z trzech części, a mianowicie: z czasu potrzebnego na ogrzewanie wyrobów τ_1 , z czasu zużywanego na wypalanie τ_2 i z czasu potrzebnego na studzenie wypalonych wyrobów τ_3 . W związku z tym długości poszczególnych stref pieca tunelowego wynoszą

$$l_1 = \frac{G \cdot \tau_1}{F \cdot g} \text{ m} \quad l_2 = \frac{G \cdot \tau_2}{F \cdot g} \text{ m} \quad l_3 = \frac{G \cdot \tau_3}{F \cdot g} \text{ m} \quad [\text{VII-2}]$$

gdzie l_1 , l_2 i l_3 są to długości (w m) strefy podgrzewania, wypalania i studzenia. Oczywiście, że

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \quad \text{ i } \quad L = l_1 + l_2 + l_3 \quad [\text{VII-3}]$$

Stosunek długości poszczególnych stref pieców tunelowych, przeznaczonych do wypalania ceramiki budowlanej, a więc i czasu przebywania w nich wyrobów wynosi średnio

$$l_1 : l_2 : l_3 = \tau_1 : \tau_2 : \tau_3 = 1,4 : 1 : 1,3 \quad [\text{VII-4}]$$

Nowsze badania procesu wypalania wykazały, że można w piecach tunelowych szybko ogrzewać i szybko studzić wyroby ceramiki budowlanej bez obawy wyraźnego pogorszenia ich własności. Nie ma więc podstaw do budowania w piecach do wypalania tego rodzaju wyrobów stref podgrzewania i studzenia o długości większej niż strefa wypalania. Wybudowane w oparciu o powyższe badania nowoczesne piece do wypalania ceramiki budowlanej o stosunku długości stref 1 : 1 : 0,9 pracują z pełnym powodzeniem.

W piecach tunelowych do wypalania wyrobów porcelanowych podgrzewanie surowych i chłodzenie wypalonych wyrobów odbywa się bardzo wolno, wskutek czego stosunek długości poszczególnych stref wynosi w nich średnio

$$l_1 : l_2 : l_3 = 3,5 : 1 : 3,5$$

Przy ustalaniu wymiarów pieca należy pamiętać, że w długich piecach łatwiej można osiągnąć na poszczególnych jego odcinkach potrzebną tem-

peraturę i pożądany skład gazów. Ze wzrostem jednak długości pieca powiększają się opory, co wymaga stosowania większej różnicy ciśnień na początku i na końcu tunelu. Pociąga to za sobą wzrost strat gazów spalinyowych wskutek nieszczelności i zwiększone zasysanie zimnego powietrza. Dlatego należy budować piece tunelowe o możliwie najmniejszej — dopuszczalnej przez proces technologiczny długości, tym bardziej, że ze wzrostem długości powiększa się koszt budowy.

Wielkość przekroju poprzecznego pieca F nie tylko wpływa, jak wynika ze wzoru VII-1, na długość pieca, a przy stałej długości na jego wydajność, lecz również w bardzo dużym stopniu i na równomierność rozkładu temperatur w przekroju poprzecznym tunelu. Ujemny wpływ niewłaściwego rozkładu temperatur w tym przekroju można częściowo usunąć przez powiększenie długości pieca. Opierając się na analizie pracy wielu pracujących z powodzeniem pieców tunelowych, przy obliczaniu ze wzoru [VII-1] długości tunelu można przyjmować orientacyjnie, że

$$L = \varphi F$$

gdzie: $\varphi = 32$ przy $F = 4 \text{ m}^2$	$\varphi = 50$ przy $F = 1,5 \text{ m}^2$
$\varphi = 36$ $F = 3 \text{ m}^2$	$\varphi = 55$ $F = 1,2 \text{ m}^2$
$\varphi = 40$ $F = 2,5 \text{ m}^2$	$\varphi = 62$ $F = 1 \text{ m}^2$
$\varphi = 45$ $F = 2 \text{ m}^2$	$\varphi = 70$ $F = 0,5 \text{ m}^2$

Gęstość wypełnienia g tunelu wypalanyymi wyrobami niewiele się różni od gęstości załadunku pieców komorowych. Ze względu na konieczność pozostawiania luzu o szerokości od 50 do 100 mm pomiędzy ścianami tunelu i załadowanymi wyrobami oraz przerw o szerokości od 300 do 500 mm między wypełnieniem dwóch sąsiednich wózków gęstość wypełnienia tunelu zwykle jest nieco mniejsza (do 10%) od gęstości wypełnienia pieców komorowych, podanej w poprzednim rozdziale na str. 183.

Ilość powietrza potrzebnego na ostudzenie G kg wypalonych wyrobów oblicza się przy pomocy następującego wzoru:

$$V_{pow} = \frac{G \cdot c \cdot (t_1 - t_2)}{c_{pow} (t_1 - 300)} \text{ m}^3 \quad \text{[VII-5]}$$

gdzie: c — średnie ciepło właściwe wyrobów w $\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$,

t_1 — temperatura wypalania w $^\circ\text{C}$,

t_2 — końcowa temperatura ochłodzonych wyrobów w $^\circ\text{C}$, w granicach od 50 do $100 \text{ }^\circ\text{C}$,

c_{pow} — średnie ciepło właściwe powietrza w $\text{kcal/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$,

$(t_1 - 300)$ — temperatura, do której ogrzewa się w tunelu chłodzące powietrze; przyjmuje się w obliczeniach, że temperatura powyższa jest o 300°C niższa od temperatury wypalania t_1 .

Podobny wzór stosuje się przy obliczaniu ilości powietrza, które jest potrzebne do studzenia obmurza wózków.

Przy obliczaniu wielkości przekroju poprzecznego kanałów i wydajności wentylatorów należy uwzględnić ilość powietrza, która przedostaje się do pieca przez wszelkiego rodzaju nieszczelności.

Ilość gazów spalinowych ustala się na podstawie bilansu materiałowego pieca.

Zużycie paliwa oblicza się na podstawie bilansu cieplnego pieca, przy czym układa się zwykle oddzielnie bilans cieplny dla strefy chłodzenia i oddzielnie wspólny bilans cieplny dla stref podgrzewania i wypalania.

Schematy bilansów cieplnych pieca tunelowego przedstawiają się w sposób następujący:

I. BILANS CIEPLNY STREFY CHŁODZENIA

A. PRZYCHÓD

1. Ciepło zawarte w wypalonych wyrobach.
2. Ciepło zawarte w obmurzu wózków.

B. ROZCHÓD

1. Ciepło zawarte w wyrobach ochłodzonych.
2. Ciepło zawarte w ochłodzonym obmurowaniu wózków.
3. Ciepło zawarte w powietrzu odprowadzanym do spalania paliwa.
4. Ciepło zawarte w powietrzu odprowadzanym poza piec.
5. Straty ciepła do otoczenia.

II. BILANS CIEPLNY STREF PODGRZEWANIA I WYPALANIA

A. PRZYCHÓD

1. Wartość opałowa paliwa.
2. Ciepło zawarte w paliwie (bez wartości opałowej).
3. Ciepło zawarte w powietrzu doprowadzonym do spalania.

B. ROZCHÓD

1. Ciepło zużyte na wyparowanie i przegrzanie wilgoci zawartej w wyrobach.
2. Ciepło zużyte na reakcje chemiczne.
3. Ciepło zawarte w gazach odlotowych.
4. Ciepło zawarte w wypalonych wyrobach.
5. Ciepło zawarte w obmurzu wózków.
6. Straty ciepła do otoczenia.

Praktycznie rozchód ciepła przy wypalaniu w piecach tunelowych wyrobów dynasowych wynosi od 20 do 25% ich ciężaru, a przy wypalaniu wyrobów szamotowych — od 10 do 16%.

Przy obliczaniu oporów pieca tunelowego można uwzględnić następujące dane praktyczne:

1. Opór wypełnienia pieca wyrobami od 0,06 do 0,1 mm H₂O na 1 mb.
 2. Ciśnienie w strefie wypalania od 0 do 1,5 mm H₂O
 3. Ciśnienie na początku strefy chłodzenia
 4. Rozrzedzenie (podciśnienie) w końcu strefy podgrzewania
- } 0,1 mm H₂O na 1 m
długości strefy

PIECE TYGLOWE, DONICOWE I WANNOWE

1. Wiadomości wstępne. Piece tyglowe

Piece tyglowe, donicowe i wannowe służą do topienia metali i wytapiania szkła. Różnią się one od siebie nie tylko konstrukcją i wielkością przerobu, ale również i przebiegiem procesów technologicznych.

Wymagania, jakie stawia przemysł piecom do topienia metali i wytapiania szkła, są liczne; do najważniejszych z nich należą:

1) możliwość otrzymywania metali (głównie stopów), ewentualnie szkła, o potrzebnym i stałym składzie chemicznym,

2) wysoka temperatura roztopionego metalu i szkła, szczególnie konieczna przy wykonywaniu z metali odlewów cienkościennych i w czasie klarowania masy szklanej,

3) możliwie najmniejsze utlenianie się metalu podczas przetapiania oraz pochłaniania szkodliwych domieszek z paliwa i gazów spalinowych,

4) duża sprawność cieplna,

5) duża wydajność przy małych kosztach inwestycyjnych, łatwość obsługi i niskie koszty eksploatacyjne.

Pierwszemu i trzeciemu z tych warunków najbardziej odpowiadają piece tyglowe i donicowe. Metal i szkło o określonym składzie chemicznym otrzymuje się w nich wskutek zabezpieczenia przed bezpośrednim zetknięciem się z paliwem i gazami spalinowymi. Przetapiane w piecach tyglowych metale i wytapiane w piecach donicowych szkło zmieniają swój skład nieznacznie. Reakcje chemiczne i przemiany fizykochemiczne przebiegają w tyglach i donicach w warunkach zbliżonych do laboratoryjnych. Wadami natomiast pieców tyglowych i donicowych są wysokie koszty przetapiania spowodowane dużym zużyciem tygli i donic, niską sprawnością termiczną wynoszącą od 6 do 15% wskutek małej przewodności cieplnej tygli (i donic) oraz kosztowną robocizną w przeliczeniu na jednostkę przerobu przy dość uciążliwej obsłudze.

Nieduży zgar przy przetapianiu kosztownych metali, jak miedź, cyna, aluminium itp., wyrównuje nieco niekorzystne strony przetapiania w tyglach i umożliwia ich stosowanie w przypadku niewielkich przerobów. Przyczynia się do tego również możliwość dość szybkiego uruchamiania

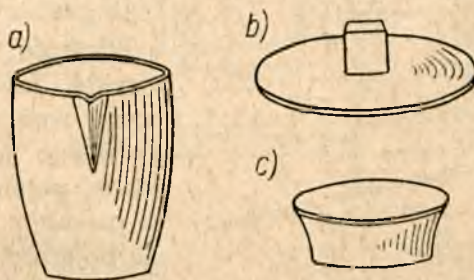
instalacji. Zgar metalu w tyglach zależy w dużym stopniu od rodzaju przetapianego stopu. Przy mosiądzach zawierających ołów (do 3%) jest on wyższy, przy przetapianiu zaś zwykłych brązów lub stopów aluminium nie przekracza 3—4%.

Piece tyglowe

Jeszcze stosunkowo niedawno stosowano piece tyglowe do przetapiania żeliwa ciągliwego i stali, szczególnie jej szlachetnych gatunków, obecnie zostały one wyparte przez piece elektryczne i na ogół piece tyglowe nie są do tych celów stosowane.

W przemyśle można spotkać znaczną liczbę odmian konstrukcji pieców tyglowych. Buduje się je na paliwo stałe, ciekłe i gazowe. Pracują one przy ciągu naturalnym lub sztucznym, najczęściej z podmuchem.

Tygle bywają grafitowe, szamotowe, koksowe i metalowe. Tygle metalowe ze specjalnego żeliwa, o składzie: C — $4,44 \div 4,46\%$, Si — $1,5 \div 1,8\%$, Mn — $0,5 \div 1,2\%$, P < 0,2%, S < 0,06%, Cr < 0,06% i Ni < 0,06%, lub stalowe ze specjalnych stali ogniodpornych są stosowane do topienia



Rys. VIII-1. Tygiel grafitowy, pokrywa i podstawka

stopów aluminiowych i cynkowych oraz innych stopów łatwo topliwych. Tygle grafitowe i szamotowe stosuje się do topienia brązów, mosiądźców i innych stopów miedzi. Dawniej (obecnie tylko wyjątkowo) stosowano je również do topienia żeliwa i stali specjalnych.

Tygle grafitowe są wykonywane z mieszaniny grafitu i glinki ogniotrwałej, niekiedy szamotu, a nawet zawierają nieduży dodatek kwarcu. Czasami glinę ogniotrwałą zastępuje się częściowo kaolinem. Łom ze zużytych tygli należy oczyścić i rozdrobnić, bywa również dodawany do mieszaniny. Zawartość grafitu w mieszaninie w tyglach do topienia trudno topliwych (np. Ni) względnie stali lub żeliwa dochodzi do 60%. Przy przetapianiu stopów miedzi zawartość grafitu w tyglach dobrego gatunku dochodzi do 35%, a w tyglach gorszego gatunku — $12 \div 15\%$. Gлина ogniotrwała z dodatkiem od 10 do 20% szamotu stanowi resztę składu mieszaniny, z której wykonuje się tygle. Dodatek

grafitu ma na celu zwiększenie odporności tygli na działanie wysokich temperatur oraz zmniejszenie ich kurczliwości powodującej pękanie tygli w wysokich temperaturach. Im większa jest zawartość grafitu, tym tygle są bardziej odporne na działanie wysokiej temperatury (żar), lecz są droższe.

Tygle szamotowe są wykonywane z szamotu, którego ziarna nie przekraczają 3 mm, z dodatkiem gliny ogniotrwałej w ilości ok. 40%. Wiąże ona ziarna szamotu, zwiększając zdolność tygli do wytrzymywania większych wahań temperatury.

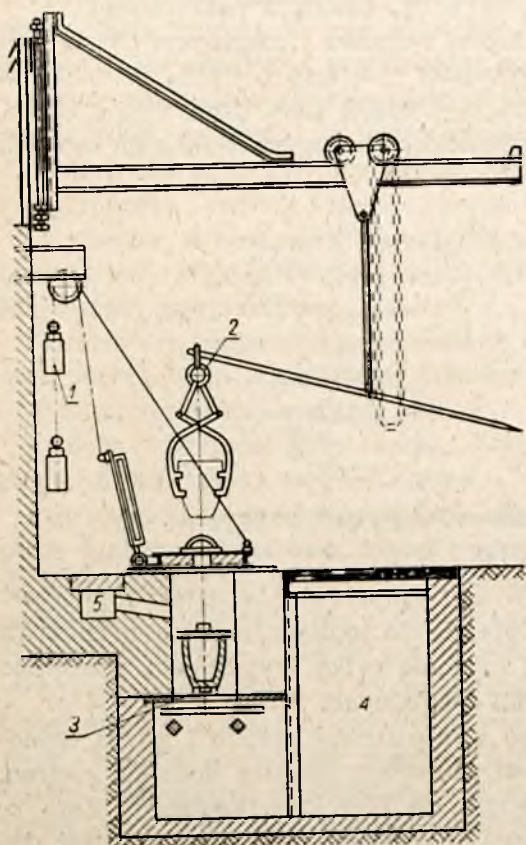
Spotyka się również tygle zawierające 40% mielonego szamotu i gliny ogniotrwałej oraz 20% mielonego koksu. Są one „namiastką” tygli grafitowych. Koks użyty do tego celu nie powinien zawierać więcej niż 0,9%

siarki i 9% popiołu, w popiele zaś nie powinno być tlenków sodu i potasu. Wytrzymałość takich tygli na działanie wysokich temperatur (żaru) nie jest duża, lecz są one znacznie tańsze od tygli grafitowych.

Wielkość tygli określa się zwykle tzw. markami, przy czym według oznaczenia angielskiego jedna marka odpowiada pojemności 0,157 l, co z pewnym „zapasem” równa się objętości 1 kg roztopionego brązu. Produkowane są tygle o wielkości od 1 do 300 marek. Mniejsze tygle (do 50 marek) są używane do topienia stopów trudno topliwych (metal Monela i stopów Fe), średnie (do 150 marek) — do topienia stopów miedzi, a duże (powyżej 150 marek) — do topienia stopów metali lekkich.

Kształt tygli bywa różnorodny dostosowany do konstrukcji pieca. Najczęściej spotykane tygle przedstawiono na rys. VIII-1.

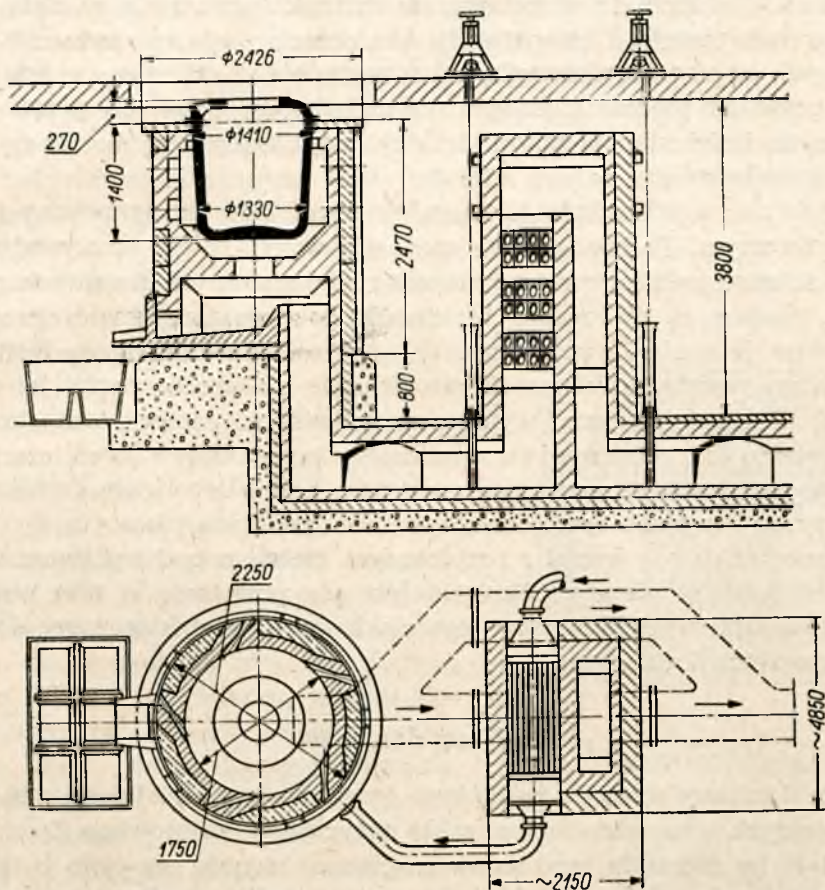
VIII-1. Firmy produkujące ty-



Rys. VIII-2. Piec tyglowy o obsłudze ręcznej: 1 — przeciwwaga, 2 — kleszcze do wyciągania tygli, 3 — ruszt, 4 — studzienka, 5 — przewód dymowy

gle wykonują również z tego samego materiału pokrywy i podstawki (rys. VIII-1).

Piece tyglowe do topienia metali bywają typu szybowego i trzonowego. Choć w komorze roboczej pieców pierwszego typu mieści się zwykle tylko 1 tygiel, a w piecach drugiego typu — kilka lub nawet kilkanaście, to piece tyglowe typu szybowego są bardziej rozpowszechnione. Jeden z takich pieców prostej konstrukcji o obsłudze ręcznej jest przedstawiony na rys. VIII-2. Piec powyższy pracuje przy ciągu naturalnym na paliwie stałym, najczęściej na koksie, który wypełnia całą przestrzeń pomiędzy



Rys. VIII-3. Piec systemu Fulmana do stopów białych metali

tygłem i ścianami szybu. Tygiel jest ustawiony na podstawie spoczywającej na ruszcie 3. Kanał odprowadzający gazy spalinowe do komina przy prawidłowej konstrukcji pieca znajduje się powyżej tygla przynajmniej o 120 mm. Ażeby zabezpieczyć przetapiany metal od szkodliwego działania paliwa i gazów spalinowych, tygiel przykrywa się pokrywą. Odległość pomiędzy pokrywą tygla a pokrywą szybu wynosi zwykle od 0,5 do 0,6 m.

Zużycie koksu w omawianym piecu jest bardzo duże, a jego sprawność — mała i w przypadku bardzo starannego prowadzenia procesu dochodzi do 7%. Przyczyną tego jest małe przewodnictwo cieplne tygli grafitowych lub szamotowych, wysoka — dochodząca do 1600°C — temperatura gazów odlotowych oraz duże straty ciepła na rozgrzanie obmurza i znaczne straty przez promieniowanie.

Piece tyglowe stosowane do przetapiania metali w tyglach metalowych często noszą nazwę pieców kotłowych. Stosuje się je do przetapiania stopów metali lekkich, do utrzymywania roztopionego metalu w stałej temperaturze, wyższej od temperatury krzepnięcia, i do sporządzania łatwo topliwych stopów łożyskowych, które następnie są odlewane w tzw. gęsi. Jako przykład pieców kotłowych, o dużej wydajności, do przetapiania większych ilości stopów metali lekkich rozpatrzmy piec systemem Fulmina, przedstawiony na rys. VIII-3.

Jest to piec o pojemności kotła, mieszczącej 2000 kg, ogrzewany gazem generatorowym. Paliwo gazowe spala się w tym piecu dopływając poprzez dziesięć palników równomiernie rozmieszczonych na dwóch poziomach. Spaliny są kierowane z pieca do rekuperatora, gdzie ogrzewają potrzebne do spalania powietrze. W razie oczyszczania lub remontu rekuperatora można je skierować bezpośrednio do komina pomijając rekuperator. Roztopiony metal wybiera się z kotła za pomocą czerpaków po podniesieniu (nie pokazanej na rysunku) pokrywy. Aby ułatwić czerpanie metalu, piec jest ustawiony pod poziomem hali odlewniczej. Opróżnianie kotła przez czerpanie roztopionego metalu jest wadą pieca.

W przypadku gdy kocioł z roztopionym metalem pod wpływem wysokiej temperatury ulegnie pęknięciu lub gdy powstanie w nim wskutek korozji dziura, wyciekający z niego ciekły metal jest kierowany do specjalnego zbiorniczka.

2. Piece donicowe

Piece donicowe służą do wytapiania stosunkowo niewielkich ilości szkła o specjalnych własnościach (np. szkła optycznego, kolorowego itp.).

Szkłem (w szerokim tego słowa znaczeniu) nazywa się ciało bezpostaciowe stanowiące stop skrzepnięty bez krystalizacji. Przy ogrzewaniu przechodzi ono stopniowo w dużym zakresie temperatur ze stanu stałego w stan ciekły. Początkowo szkło robi się plastyczne, zachowując się jak ciecz o dużej lepkości. Następnie w miarę wzrostu temperatury lepkość jego maleje, wreszcie otrzymuje się szkło całkowicie roztopione i łatwo płynne.

Głównymi składnikami produkowanych szkieł są: SiO_2 , Na_2O , K_2O , CaO , BO , ZnO , Al_2O_3 , PbO . Ze składników tych krzemionka wchodzi w skład wszystkich szkieł, pozostałe zaś — w zależności od rodzaju i przeznaczenia szkła. Zwykle oprócz SiO_2 szkła zawierają jeszcze przynajmniej

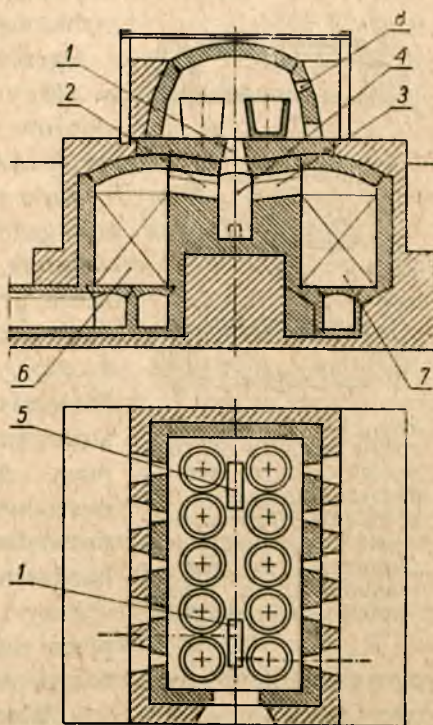
dwa inne składniki. Najczęściej spotyka się szkła sodowo-wapniowe. Normalne szkło tego typu zawiera ok. 75% SiO_2 , 13% Na_2O i 12% CaO . Szlachetniejsze są szkła potasowo-ołowiowe posiadające stosunkowo duży współczynnik załamania światła (np. dla szkła zawierającego 14% K_2O i 25% PbO współczynnik załamania światła wynosi 1,55).

Oczywiście, surowce wprowadzane do pieca szklarskiego powinny zawierać składniki niezbędne do produkowania danego gatunku szkła. Podstawowym surowcem zawierającym krzemionkę jest czysty piasek, jak najmniej zanieczyszczony tlenkami żelaza, które zabarwiają szkło na zielono. Surowcami, w których znajdują się sód, wapń, potas i ołów, są siarczany sodowy (Na_2SO_4), wapnienie (najodpowiedniejsze: szpat wapienny wolny od domieszek żelaza albo kreda), węglan potasowy (K_2CO_3) i minia (Pb_3O_4). Oprócz powyższych surowców są stosowane w zależności od składu i rodzaju produkowanego szkła również inne, a poza tym — stłuczki szklane ułatwiające topienie oraz substancje odbarwiające i klarujące.

Zadaniem substancji odbarwiających jest usunięcie zielonego zabarwienia spowodowanego obecnością żelaza lub zabarwienia żółtego powstałego wskutek obecności siarczku sodowego (Na_2S). Substancje klarujące — głównie trójtlenek arsenu (As_2O_3) — usuwają drobne pęcherzyki gazu i ułatwiają dobre wymieszanie stopionej masy szklanej.

W piecach donicowych proces wytapiania szkła odbywa się w donicach. Wypala się je z gliny ogniotrwałej zmieszanej z gliną wypaloną z dodatkiem zmielonych skorup ze starych donic, które ze względu na wysoki stopień wypalenia stanowią cenny surowiec. Donice są to naczynia okrągłe, czasem owalne, o pojemności od 300 do 1000 litrów, otwarte lub przy produkcji niektórych gatunków szkła zaopatrzone w pokrywy chroniące ich zawartość przed szkodliwym wpływem redukującego płomienia.

Piece donicowe, podobnie jak piece tyglowe, pracują w sposób okresowy. Pełny cykl pracy pieca donicowego składa się z następujących operacji: rozgrzanie pieca i donic, wprowadzanie do nich porcjami stłuczek szklanych i wsadu (surowce w namiarze),



Rys. VIII-4. Piec donicowy: 1 — palniki, 2 i 3 — kanały powietrzny i gazowy, 4 — wstępna komora spalań, 6 i 7 — regeneratory, 8 — otwory robocze

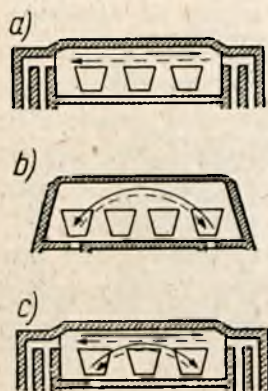
topienie wsadu i tworzenie się szkła, klarowanie (odgazowanie) i ujednorodnienie (homogenizacja) masy szklanej oraz studzenie. Każdej z powyższych operacji odpowiada określona temperatura.

Trzon pieca donicowego (rys. VIII-4) i jego ściany boczne są zbudowane z cegły szamotowej, sklepienie zaś — z cegły dynasowej. Pod trzonym znajdują się zwykle kanały (nie zaznaczone na rysunku), przez które przepływa powietrze chłodzące go, oraz regeneratory (lub rekuperatory) do podgrzewania paliwa gazowego (zwykle gazu generatorowego) i powietrza. W komorze roboczej ustawia się donice w ilości od 6 — w małych piecach — do 16 — w dużych piecach. Naprzeciw każdej z nich w ścianach bocznych są otwory robocze, przez które wprowadza się do donic wsad i pobiera do przerobu gotową masę szklaną. Donice są wprowadzane do pieca przez otwór, o odpowiednich wymiarach, znajdujący się w jednej z jego krótszych ścian.

Komora robocza w piecach donicowych może być prostokątna (jak w piecu przedstawionym na rys. VIII-4), okrągła lub owalna. Piece okrągłe pozwalają na dogodne rozmieszczenie robotników pobierających z donic roztopione szkło do przerobu, natomiast warunki ogrzewania w nich są gorsze.

Ogrzewanie w piecach donicowych odbywa się w różny sposób. Strumień palących się gazów jest doprowadzany do pieca od góry lub od dołu, albo w sposób kombinowany, jak pokazano schematycznie na rys. VIII-5. Przy dolnym doprowadzaniu gazów palniki znajdują się w trzonie pieca, wskutek czego gazy spalinowe ogrzewają donice, które przewodzą ciepło do wnętrza, i środkową część sklepienia pieca, która przekazuje ciepło drogą promieniowania swobodnej powierzchni (zwierciadłu) masy szklanej w donicach. Wskutek złego przewodnictwa ścianek donic ogrzewanie masy szklanej odbywa się głównie wskutek promieniowania sklepienia, które przy dolnym doprowadzeniu płomienia ogrzewa się i promieniuje bardzo nierównomiernie.

Przy górnym doprowadzaniu płomienia do pieca donicowego dopalające się gazy spalinowe płyną równomiernym strumieniem pomiędzy sklepieniem i zwierciadłem masy szklanej w donicach. Wskutek tego sklepienie ogrzewa się równomierniej i do wyższej temperatury oraz wypromieniowuje ciepło na swobodną powierzchnię szkła w donicach bardziej intensywnie niż w piecach z dolnym doprowadzaniem płomienia. Oprócz tego przepływające ponad donicami gorące gazy spalinowe również oddają ciepło masie szklanej przez bezpośrednie promieniowanie. W piecach więc z górnym



Rys. VIII-5. Schematy ruchu gazów w piecach donicowych: a) piec z górnym doprowadzeniem płomienia, b) piec z dolnym doprowadzeniem płomienia, c) piec z kombinowanym doprowadzeniem płomienia

Przy górnym doprowadzaniu płomienia do pieca donicowego dopalające się gazy spalinowe płyną równomiernym strumieniem pomiędzy sklepieniem i zwierciadłem masy szklanej w donicach. Wskutek tego sklepienie ogrzewa się równomierniej i do wyższej temperatury oraz wypromieniowuje ciepło na swobodną powierzchnię szkła w donicach bardziej intensywnie niż w piecach z dolnym doprowadzaniem płomienia. Oprócz tego przepływające ponad donicami gorące gazy spalinowe również oddają ciepło masie szklanej przez bezpośrednie promieniowanie. W piecach więc z górnym

doprowadzaniem powietrza wymiana ciepła jest bardziej racjonalna. Piece z kombinowanym doprowadzaniem gazów ogrzewających stosuje się rzadko, ponieważ mają bardziej skomplikowaną konstrukcję.

Palniki w piecach donicowych bywają komorowe, szybowe i szczelino-we. Piece z dolnym doprowadzaniem gazów mają zwykle palniki komo-rowe, jak na rys. VIII-4. Wstępna komora spalania w tych paleniskach jest wykonywana, ze względu na wysoką temperaturę, z cegły dynasowej lub z najlepszego gatunku cegły szamotowej. Piece z górnym prowadze-niem gazów mają palniki szybowe (rys. VIII-5a).

W celu zapobieżenia rozwarstwianiu się płomienia prędkość gazów spa-linowych przy ich górnym prowadzeniu powinna być w okresie wytapia-nia rzędu 12—15 m/sek, licząc na sumę objętości paliwa gazowego i po-wietrza w temp. 1300°C.

Spalanie w piecach donicowych ze względu na konieczność uzyskania wysokich temperatur i możliwie małych strat kominowych odbywa się przy niewielkim nadmiarze powietrza (od 0 do 20%). Należy przy tym przestrzegać, aby spalanie było zupełne.

Proces wytapiania szkła w piecach donicowych przebiega w sposób na-stępujący: po ogrzaniu pieca i donic do temperatury ponad 1200°C wpro-wadza się do donic porcję stłuczek szklanych, których temperatura to-pnienia jest zwykle niższa niż mieszaniny surowców stanowiących wsad.

Stłuczki mięknąc pokrywają półciekłą warstwą dno oraz ściany donic i chronią w ten sposób materiał donic od bezpośredniego stykania się ze wsadem. Chemiczne oddziaływanie bowiem w wysokich temperaturach niektórych składników wsadu na materiał donic może doprowadzić do szybkiego ich zużycia. Po upływie paru godzin doprowadza się do donic pierwszą porcję wsadu, a następne — w pewnych odstępach czasu (co parę godzin), gdy porcje poprzednie zostaną całkowicie stopione.

Wsad należy wprowadzać niewielkimi porcjami do samego środka do-nic, aby układał się on wewnątrz w postaci stożka. W miarę topienia się wsadu pod wpływem promieniowania sklepienia stop spływa z powierz-chni stożka na dno donicy.

Podczas topienia wsadu w donicach pod wpływem wysokiej tempera-tury zachodzi szereg złożonych procesów fizycznych i reakcji chemicz-nych. Przede wszystkim zostaje usunięta woda. Następnie w miarę wzro-stu temperatury zaczynają przebiegać reakcje chemiczne między krze-mionką, siarczanem sodowym (lub sodą) i węglanem wapniowym. W re-zultacie tworzy się szkło i jednocześnie wydziela się dwutlenek węgla i trójtlenek siarki. Im wyższa jest temperatura, tym intensywniej prze-biegają powyższe procesy.

W końcu okresu wytapiania temperatura powstałej masy szklanej wy-nosi ok. 1500°C. Wygląda ona dość jednorodnie, jest jednak niejedno-rodna pod względem składu chemicznego i zawiera dużo pęcherzyków gazowych. Ujednorodnieniu i odgazowaniu otrzymanej masy jest po-

święcona następna operacja w procesie wytwarzania szkła, zwana klarowaniem. Aby usunąć pęcherzyki gazów z masy szklanej, utrzymuje się jej temperaturę na możliwie najwyższym poziomie (do 1500°C), wskutek czego lepkość masy silnie maleje. Ułatwia to wypływanie pęcherzyków gazowych na jej powierzchnię.

W celu przyspieszenia klarowania, do roztopionej masy wprowadza się tlenki arsenu, które wskutek dużego ciężaru właściwego toną w masie szklanej, opadając na dno donicy. Tlenki arsenu energicznie parują w temperaturze, którą posiada masa. Wielkie ich pęcherze pochłaniają pęcherzyki innych gazów i, unosząc się do góry, powodują w donicach energiczne mieszanie różnych warstw masy szklanej. Zamiast tlenków arsenu można dla przyspieszenia klarowania wprowadzić na dno donicy bardzo mokre kawałki drewna. Wydzielające się przy tym pęcherze pary zastępują działanie tlenu.

Ujednorodnienie masy szklanej zachodzi nie tylko wskutek mieszania się jej w czasie odgazowania, lecz również i pod wpływem prądów konwekcyjnych wewnątrz donic, wywołanych różnicą temperatur masy na powierzchni i przy ich ścianach.

Sklarowana masa szklana nie nadaje się w wysokiej temperaturze do formowania wyrobów, ponieważ jej lepkość i ciągliwość są małe. Należy ją ostudzić do odpowiedniej temperatury zależnej od wymiarów produkowanych przedmiotów i składu masy. Przy wyrobie dużych przedmiotów (np. luster lanych) temperaturę masy obniża się prawie do 1000°C, przy produkcji przedmiotów drobnych — do 1250°C, a przy wyrobie szkieł trudno topliwych — tylko do 1400°C.

Gdy masa szklana jest dobrze sklarowana, zaczyna się pobieranie szkła do przerobu. Aby uniknąć gromadzenia się zanieczyszczeń, które pływają po powierzchni, wkłada się do donicy szmatowy pływający pierścień, z wnętrza którego pobiera się wolną od zanieczyszczeń roztopioną masę szklaną.

Czas trwania pełnego cyklu pracy pieców donicowych (wstępne ogrzewanie, wytapianie, klarowanie, studzenie i wyrób przedmiotów szklanych) zwykle trwa 24 godziny, jeżeli wyrób przeprowadza tylko jedna zmiana. Przy produkcji szkieł optycznych i trudno topliwych cykl pracy jest dłuższy wskutek znacznego przedłużenia się czasu wytapiania.

Piece donicowe pracujące okresowo zużywają dużo paliwa na 1 tonę wytopionej masy szklanej i wykazują niewielką wydajność w porównaniu z piecami wannowymi. Stosuje się je do produkcji szkieł gatunkowych (np. optycznych, chemicznych itp.) oraz szkieł kolorowych i artystycznych, ponieważ masa szklana uzyskiwana w donicach jest bardziej jednorodna niż w piecach innych typów. Do zalet pieców donicowych należy zaliczyć również możliwość jednoczesnego wytapiania w nich kilku gatunków szkieł.

3. Szklarskie piece wannowe

Piece wannowe są stosowane w przemyśle szklarskim do wytapiania szkła w większych ilościach niż w piecach donicowych. Dzielą się one na okresowe i ciągłe.

Szklarski piec wannowy, pracujący okresowo, różni się pod względem konstrukcyjnym od pieca donicowego, natomiast proces technologiczny wytapiania szkła przebiega w wannie tego pieca w ten sam sposób i w tej samej kolejności co w donicach. Różnica polega również i na tym, że objętość wanny jest wielokrotnie większa niż donic, wskutek czego wydajność tego pieca jest również znacznie większa.

Gazy w piecach wannowych są doprowadzane górami, wskutek czego przekazują ciepło masie szklanej przez bezpośrednie promieniowanie na jej swobodną powierzchnię, która w piecach wannowych jest od 2 do 3 razy większa niż w piecach donicowych. Znaczną część ciepła otrzymuje masa również wskutek promieniowania sklepienia. Wynika z tego, że w piecach wannowych ciepło jest wykorzystywane do ogrzewania masy szklanej bardziej prawidłowo niż w piecach donicowych.

Szklarskie piece wannowe o działaniu okresowym są stosowane do wytapiania trudno topliwych szkieł wymagających wysokich temperatur (powyżej 1500°C). Wytapianie tego rodzaju szkieł w donicach byłoby zbyt kosztowne, ponieważ wytrzymują one w tak wysokich temperaturach 2 lub najwyżej 3 wytapiania. Wanny okresowych pieców szklarskich, wykonywane z dużych bloków ceramicznych wysokiego gatunku i dobrze chłodzone, wytrzymują znacznie dłuższy okres czasu niż donice.

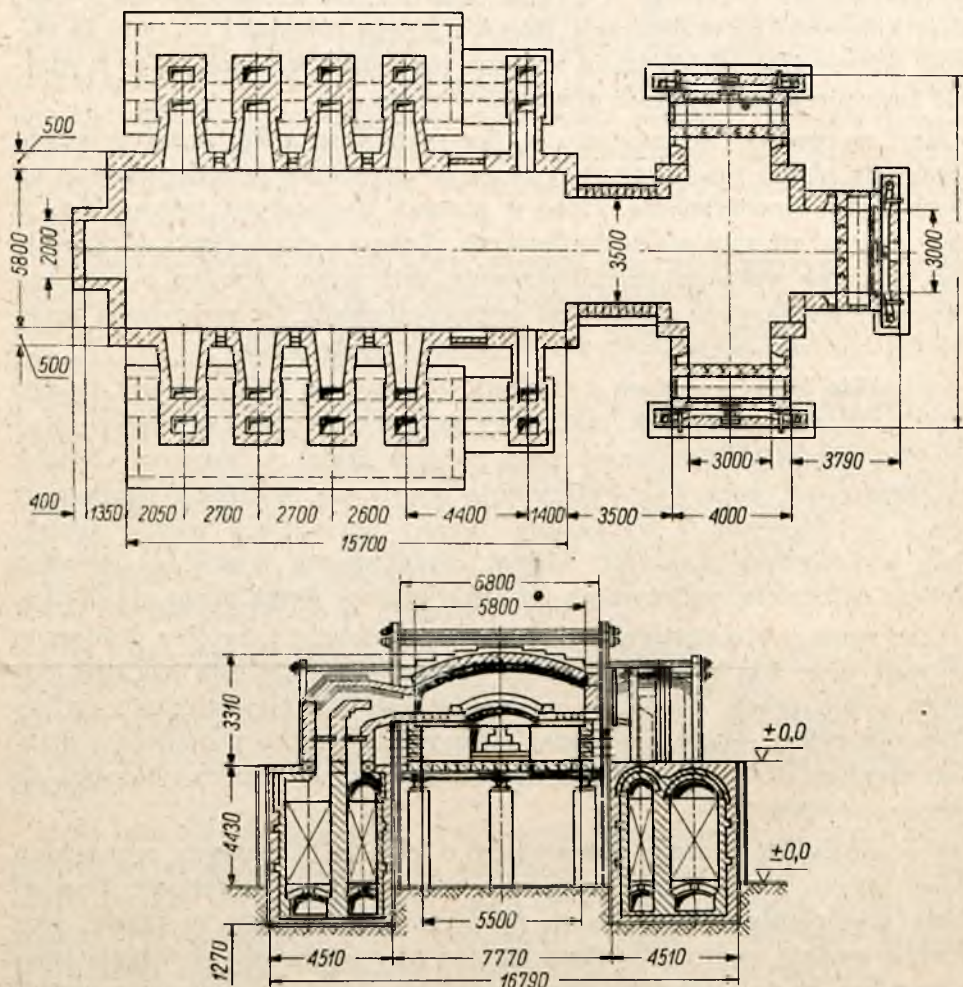
Piece wannowe o działaniu okresowym, podobnie jak piece donicowe, zużywają dużo ciepła, a więc i dużo paliwa, na rozgrzanie pieca na początku cyklu pracy. Ciepło to następnie traci się nieużytecznie po zakończeniu cyklu. Wady powyższej nie posiadają piece wannowe o działaniu ciągłym, które są obecnie najbardziej ekonomicznymi piecami do wytapiania szkła.

W wannowych piecach szklarskich o działaniu ciągłym wytapianie szkła i wyrób przedmiotów szklanych odbywa się bez przerwy. Temperaturę wytapiania utrzymuje się w tych piecach stałą w czasie, lecz zmienną wzdłuż wanny. Zwiększa się ona od miejsca wprowadzania wsadu do pieca aż do wartości maksymalnej (ok. 1480°C) i następnie powoli obniża się do temperatury odpowiadającej masie szklanej nadającej się do wyrobu.

Nieużyteczna strata ciepła na ogrzewanie obmurza jest w tych piecach minimalna. Ciepło wypromieniowywane przez gazy spalinowe, sklepienie i obmurze pieca zużywa się bezpośrednio na ogrzewanie swobodnej powierzchni szkła w wannie. Sprzyja to znacznemu zmniejszeniu zużycia ciepła na 1 kg wytopionej masy szklanej. Gdy w piecach donicowych zu-

żywa się na wytopienie 1 kg szkła od 10 000 do 20 000 kcal, w piecach wannowych o działaniu ciągłym — tylko od 4000 do 5000 kcal.

Wymiary szklarskich pieców wannowych zależą od ich wydajności i wahają się w dużych granicach. Długość wielkich, nowoczesnych pieców wannowych do wytapiania szkła okiennego dochodzi do 32 m przy szerokości od 6 do 6,5 m. W dużych piecach wannowych może się zmieścić do 1000 t masy szklanej.



Rys. VIII-6. Wannowy piec szklarski

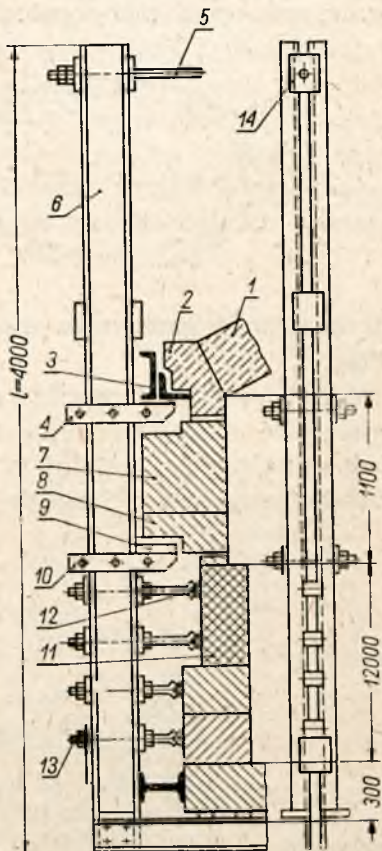
Na rys. VIII-6 jest przedstawiony wannowy piec szklarski średniej wielkości, o działaniu ciągłym oraz o wydajności ok. 65 t masy szklanej na dobę. Wanna tego pieca jest połączona przetokiem o szerokości 3500 mm z kanałem, na którym są ustawione trzy maszyny do wyrobu szkła.

Dno wanny spoczywa na belkach dwuteowych opartych na murowanych kolumnach. Ściany i sklepienie tego pieca są zawieszane na pionowych kolumnach lub na dwuteowych słupach za pomocą odpowiednich konsoli, jak pokazano na rys. VIII-7. Szczelinę pomiędzy wanną i wiszącą nad nią ścianą wypełnia się cegłą dynasową. Z dynasu wykonuje się również ściany i sklepienie pieca. Cała konstrukcja pieca wannowego jest ściągnięta na górze i na dole odpowiednimi stalowymi cięgnami.

Głębokość pieca wannowego nie jest na całej jego długości jednakowa. Ustala się ją w zależności od stopnia przezroczystości masy szklanej. Im bardziej masa jest przezroczysta dla promieni ciepłych, tym większa powinna być głębokość wanny, aby zapobiec zbyt silnemu ogrzewaniu jej dna, co może być przyczyną szybszego jego zużycia. Przy wytapianiu ciemnych szkieł butelkowych głębokość wanny może wynosić od 800 do 900 mm. W piecach wannowych do wytapiania szkieł okiennych głębokość wanny powinna wynosić w strefie wytapiania i klarowania od 1200 do 1500 mm. W strefie studzenia, gdzie panuje niższa temperatura, głębokość wanny jest mniejsza o ok. 300 mm.

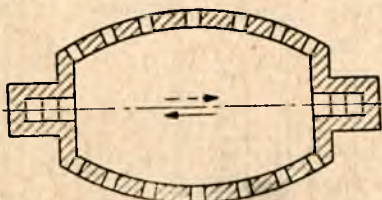
Ruch gazów w wannowych piecach szklarskich o działaniu ciągłym ma kierunek poprzeczny, podłużny i w kształcie podkowy. Poprzeczny kierunek gazów (rys. VIII-6) stosuje się w piecach o dużej i średniej wielkości. Wanna o poprzecznym kierunku przepływu ognia posiada od 3 do 8 par palników umieszczonych naprzeciw siebie wzdłuż bocznych ścian. Takie rozmieszczenie palników pozwala na dobre ogrzanie przestrzeni roboczej pieca i na regulowanie temperatury, ciśnienia i atmosfery w różnych miejscach w kierunku jego długości.

W piecach o wymiarach mniejszych i średnich palniki umieszcza się często w jednej ze ścian poprzecznych i uzyskuje się kierunek ruchu gazów w kształcie podkowy (rys. IV-22). Zaletą takiego rozmieszczenia pal-



Rys. VIII-7. Zawieszenie sklepienia i ścian wannowego pieca szklarskiego: 1 — sklepienie, 2 — stopa, 3 — oparcie stopy, 4 — konsola sklepienia, 5 — cięgno, 6 — kolumna, 7 — ściana, 8 — blok oporowy ściany, 9 — metalowa płyta, 10 — konsola, 11 — bloki basenu, 12 — kątownik wiązania basenu, 13 — śruba cięgna, 14 — płytka kolumny

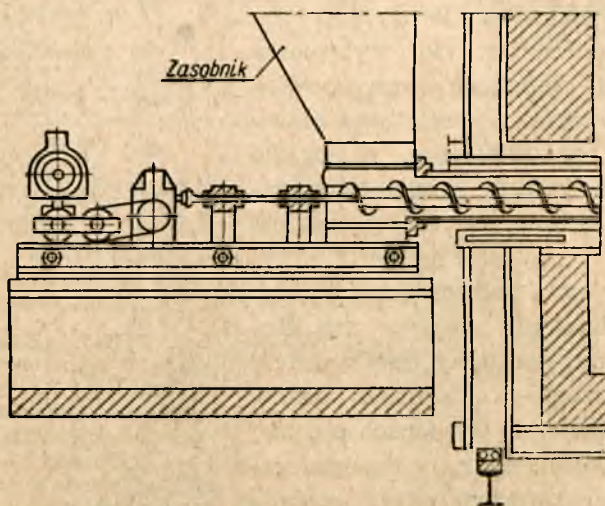
ników jest wydłużenie drogi palących się gazów w piecu, co zapewnia zakończenie procesu spalania nawet w piecach małych. Ruch gazów w kształcie podkowy pozwala poza tym na dobre ogrzanie masy szklanej, które trudno osiągnąć w małych piecach z poprzecznym kierunkiem ognia, oraz umożliwia dogodniejsze rozmieszczenie okien roboczych, przez



Rys. VIII-8. Schemat pieca wannowego z podłużnym kierunkiem przepływu gazów

które zachodzi pobieranie masy przy ręcznym wyrobie przedmiotów ze szkła.

Małe wannowe piece szklarskie, w których zamiast regeneratorów stosuje się do podgrzewania powietrza i paliwa gazowego rekuperatory, posiadają najczęściej palniki w obu poprzecznych ścianach (rys. VIII-8), wskutek czego ogień przepływa w nich wzdłuż pieca podobnie jak w me-



Rys. VIII-9. Zasilacz ślimakowy szklarskich pieców wannowych

talurgicznych piecach wannowych systemu Siemens-Martina. Okna robocze są rozmieszczone w ścianach podłużnych po obu stronach pieca.

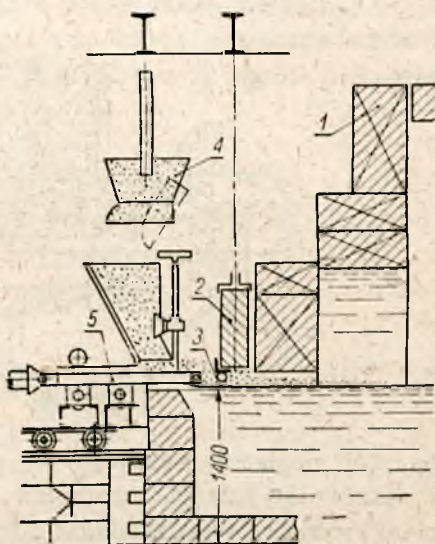
Wprowadzanie wsadu do pieców szklarskich o działaniu ciągłym odbywa się bez przerwy za pomocą zasilaczy ślimakowych lub zasypników cienkowarstwowych systemu W. Podjelskiego.

Przed wojną surowce wraz ze stłuczkami były prawie we wszystkich hutach wprowadzane co pół godziny w sposób ręczny. Wymagało to od

obsługujących piec robotników dużego wysiłku fizycznego, powodowało wahanie poziomu masy szklanej w wannie i naruszało równomierny bieg pieca. Od 1935 r. zaczęto wprowadzać urządzenia mechaniczne do ciągłego zasilania wannowych pieców szklarskich. Jako jedną z pierwszych zastosowano konstrukcję zasilacza ślimakowego przedstawionego na rys. VIII-9. Dwa takie zasilacze, ustawione przy jednej ze szczytowych ścian pieca, wprowadzają do wanny wsad bez przerwy. Ślimak zasilający otrzymuje napęd od silnika za pośrednictwem reduktora. Ilość wsadu można regulować za pomocą zasuwy (nie pokazanej na rysunku) znajdującej się w króćcu łączącym zasobnik zasilacza ze ślimakiem. Dostosowując intensywność zasilania do ilości szkła pobieranego do wyrobu, można utrzymywać poziom masy szklanej w piecu na stałej wysokości. Wprowadzenie zasilania ciągłego pozwoliło na poważne powiększenie wydajności wani.

Zasilacz ślimakowy oprócz wspomnianych powyżej zalet ma również i wady. Jedną z wad jest silny rozkurz surowców, będący przyczyną szybkiego zanieczyszczania regeneratorów.

Bardziej nowoczesny i dość szeroko obecnie rozpowszechniony jest cienkowarstwowy zasilacz systemu W. Podjelskiego, przedstawiony schematycznie na rys. VIII-10. Jego działanie jest następujące: przy czołowej ścianie pieca wannowego wykonuje się otwór zasypowy o szerokości 5 m przez przedłużenie wanny poza ścianę czołową 1, którą przesklepia się nad powyższym otworem. Sklepienie przykrywa się przesłoną 2 ze spawanej, metalowej ramy wypełnionej cegłą szamotową. Dolna część tej przesłony jest chłodzona wodą znajdującą się w chłodnicy 3. Przesłonę ustawia się tak, aby możliwie całkowicie zakrywała przestrzeń ogniową pieca i przy tym nie przeszkadzała pracy zasilacza. Surowce zmieszane z rozdrobnionymi stłuczkaami szklanymi są doprowadzane wózkami lub kadziami 4 do zasobnika bez dna. Zasobnik znajduje się nad stołem 5, który zastępuje jego dno. Stół zasilacza jest wprawiany w ruch posuwisto-zwrotny przez mechanizm korbowy napędzany silnikiem elektrycznym za pośrednictwem reduktora obrotów. Liczba suwów stołu na 1 minutę wynosi od 2 do 3. Wielkość jego skoku można regulować przez zmianę mimośrodów. Od strony pieca stół zasypnika jest zaopatrzone

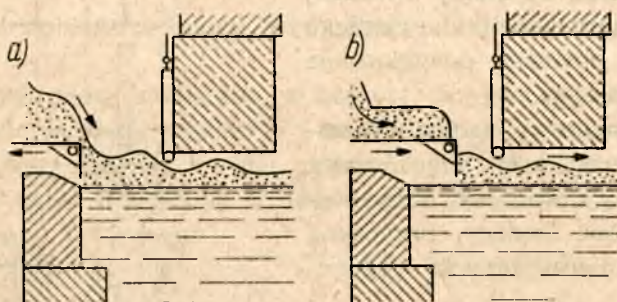


Rys. VIII-10. Zasilacz cienkowarstwowy szklarskich pieców wannowych

w chłodnicę wodną umieszczoną na wysokości 5—10 mm nad poziomem masy szklanej.

W czasie ruchu w stronę wanny wysypuje się z zasobnika na stół określona, niewielka ilość wsadu, która przy ruchu powrotnym dzięki naciskowi surowców w zasobniku zsypuje się ze stołu cienką warstwą na powierzchnię lustra masy szklanej.

Przy ruchu w przód stół przesuwają do wnętrza pieca nie tylko wsad i stłuczki zasypane przy poprzednim powrotnym jego ruchu, ale również całą warstwę pokrywającą równomiernie powierzchnię masy w wannie w zasięgu dwóch pierwszych par palników na całej jej szerokości. Schemat przesuwania wsadu po powierzchni masy szklanej w wannie jest przedstawiony na rys. VIII-11. Ilość wsadu i stłuczki, zsypywanych



Rys. VIII-11. Schemat działania zasypnika cienkowarstwowego: a) powrotny ruch stołu, b) ruch stołu naprzód

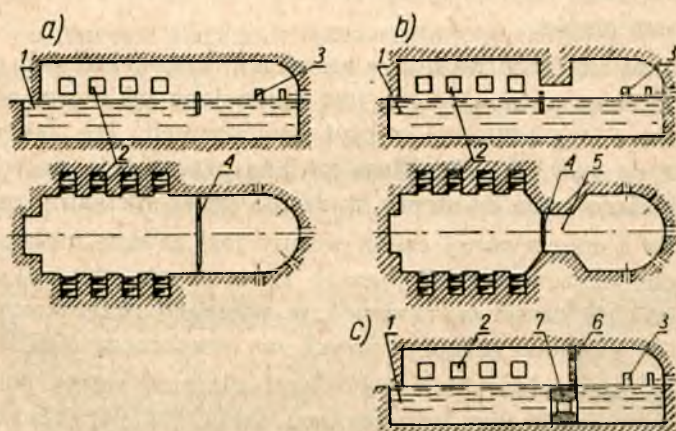
na stół zasilacza, reguluje się pionowymi zasuwami znajdującymi się w przedniej ścianie zasobnika. W przypadku stosowania omawianego cienkowarstwowego zasilacza stłuczkę szklaną należy rozdrabniać na kawałki o wielkości 5—10 mm.

W piecach wannowych o działaniu ciągłym wszystkie stadia procesu wytapiania szkła (topienie wsadu i tworzenie się szkła, klarowanie i studzenie) zachodzą w różnych miejscach pieca. W związku z tym można w nim rozróżnić strefy wytapiania, klarowania i studzenia, w których utrzymuje się odpowiednia dla tych stref temperatura. W niektórych konstrukcjach pieców wannowych o działaniu ciągłym strefy powyższe są oddzielone od siebie specjalnymi przegrodami albo zaporami.

Po wprowadzeniu wsadu do wanny, w miarę jego posuwania się wraz z roztopioną masą szklaną w kierunku drugiego końca pieca i dopływu ciepła, zaczynają przebiegać reakcje chemiczne pomiędzy krzemionką, sodą lub siarczanem sodowym a węglanem wapniowym, wchodzącymi w skład wsadu. Tworzy się przy tym szkło i wydziela dwutlenek węgla zawarty w sodzie i w węglanie wapniowym oraz trójtlenek siarki zawarty w siarczanie sodowym. Im wyższa jest temperatura, tym intensywniej przebiegają powyższe procesy i reakcje.

Wsad topi się w pierwszej strefie pieca w zasięgu pierwszych dwóch lub trzech par palników. Próbkę masy szklanej pobranej za drugą parą palników, a w długich piecach — za trzecią parą palników, nie powinna zawierać niestopionych składników wsadu. Może ona zawierać jedynie pęcherzyki dwutlenku węgla i trójtlenku siarki. Normalny przebieg procesu wytapiania charakteryzuje się obfitym wydzielaniem z powierzchni masy pękających pęcherzyków gazowych, szczególnie za pierwszą parą palników. Wytapianie bez intensywnego wydzielania się gazów nosi nazwę „martwego”. Jest to połączone z powolnym przebiegiem reakcji związanych z procesem wytapiania. Wsad topi się z trudem i wydajność szkła przy „martwym” wytopie jest mniejsza.

Klarowanie masy odbywa się zwykle w części pieca, położonej między trzecią parą palników a zaporą lub, jak w piecu przedstawionym na rys. VIII-6, pomiędzy tymi palnikami i przetokiem. W strefie klarowania



Rys. VIII-12. Schematy wannowych pieców szklarskich: a) wanna z zaporą, b) wanna z przetokiem, c) wanna z przepływem: 1 — otwór do zasilania, 2 — palniki, 3 — okna robocze, 4 — zapora, 5 — przetok, 6 — przegroda ażurowa, 7 — przepływ

i homogenizacji utrzymuje się najwyższą temperaturę (do 1500°C). Wskutek zmniejszenia się lepkości masy pęcherzyki gazów, unosząc się do góry, powodują mieszanie się różnych warstw masy szklanej, co przyczynia się do jej ujednorodnienia. Sprzyjają temu również prądy konwekcyjne istniejące w masie szklanej. Są one wywoływane różnicą temperatur w różnych miejscach pieca i na różnych jego głębokościach. Nieprzerwany ruch wewnątrz roztopionej masy, spowodowany poprzecznymi i podłużnymi prądami konwekcyjnymi, przyspiesza i polepsza homogenizację szkła.

Studzenie masy szklanej odbywa się w nieogrzewanej części pieca, oddzielonej od części ogrzewanej zaporą (rys. VIII-12a), przetokiem (rys. VIII-12b) lub przepływem (rys. VIII-12c).

Zapora jest to szamotowa przegroda pływająca 4 ustawiona w poprzek wanny i zanurzona w niej na głębokość 400—600 mm, wskutek czego masa szklana przedostaje się ze strefy klarowania do strefy studzenia pod zaporą. Wpływa to dodatnio na jakość szkła, ponieważ wystająca część zapory zatrzymuje pływające na powierzchni masy zanieczyszczenia, np. odłamki szamotu, oraz przedłuża czas przebywania w piecu warstwy powierzchniowej masy, która czasami zawiera jeszcze drobne pęcherzyki gazu. Ostatnio pływające zapory szamotowe zastąpiono w niektórych hutach chłodnicą rurową o średnicy do 100 mm. Jest ona zanurzona w masie szklanej na głębokość $\frac{3}{4}$ swojej średnicy i chłodzona wodą.

W wannach przetokowych (rys. VIII-12b) nieogrzewana część pieca jest oddzielona od części ogrzewanej kanałem o szerokości równej około połowie szerokości wanny (lub nieco szerszym). W przewężeniu jest czasami zanurzona zapora lub chłodnica. Przewężenie silnie osłabia powrotne prądy konwekcyjne masy szklanej, przez co zabezpiecza strefę studzenia przed dopływem ciepła.

Często spotyka się piece wannowe z przepływem, w których przestrzeń gazowa części nieogrzewanej pieca jest oddzielona od części ogrzewanej ścianą ażurową 6 (kratownicą) z płyt dynasowych, jak przedstawiono schematycznie na rys. VIII-12c. Masa szklana przedostaje się w tych piecach ze strefy klarowania do strefy studzenia przez specjalny przepływ 7.

Powierzchnia nieogrzewanej części wanny jest zawsze mniejsza od powierzchni części ogrzewanej. W piecach zaporowych stanowi ona od 70 do 90% powierzchni części ogrzewanej, w wannach przetokowych — od 40 do 50%, a w wannach przepływowych nie przekracza 30%.

Wydajność pieców szklarskich o działaniu ciągłym zależy od ich wielkości, konstrukcji i gatunku wytapianego szkła. Na przykład przy wyrobie mechanicznym wydajność dobową zaporowego pieca wannowego do wytapiania szkła okiennego wynosi od 600 do 1000 kg masy szklanej na 1 m² powierzchni ogrzewanej części wanny; natomiast wydajność dobową pieca przetokowego do wytapiania szkła butelkowego jest większa i wynosi od 800 do 2000 kg na 1 m² powierzchni ogrzewanej części wanny. W piecach wannowych o działaniu okresowym wydajność jest od 1,5 do 3 razy mniejsza niż w piecach o działaniu ciągłym, ponieważ na wytapianie w piecach o działaniu okresowym zużywa się tylko część czasu, w ciągu którego piec jest czynny.

Bardzo ważną częścią każdego pieca ogrzewanego paliwem gazowym są palniki. W piecach wannowych stosuje się palniki typu szybowego, do których paliwo gazowe i powietrze są doprowadzane z regeneratorów pionowymi kanałami. Aby skierować płomień w wannie na powierzchnię masy szklanej, palnikom nadaje się odpowiednie pochylenie. Są one wykonywane z materiałów odpornych na działanie wysokich temperatur. Najczęściej stosuje się cegłę dynasową wysokiego gatunku.

W palnikach strumień powietrza znajduje się nad strumieniem paliwa gazowego, przy czym kąt pomiędzy strumieniami wynosi od 15 do 25°. Prędkość wylotu gazów z palników waha się w granicach od 4 do 7 m/sek. Im większą posiadają gazy prędkość, tym prędzej się mieszają, co wpływa dodatnio na proces spalania. Mieszanie się strumieni powietrza i paliwa zaczyna się zwykle w odległości 1200—1500 mm od palnika.

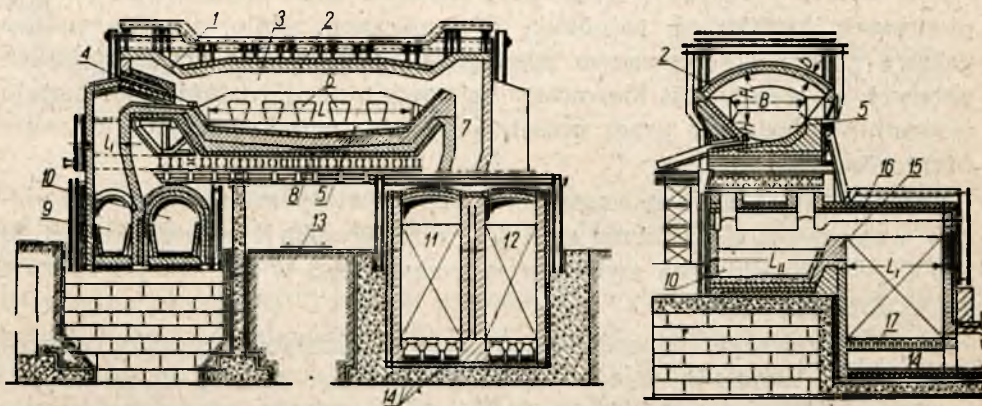
Kąt nachylenia strugi palących się gazów do powierzchni masy szklanej wynosi od 20 do 25°.

Z pewnym przybliżeniem można przyjmować, że strumień wylatujących z palników gazów zachowuje się tak, jak zostało opisane w rozdz. II-5. W związku z tym można stosować do obliczania jego charakterystycznych wymiarów wzory G. Abramowicza, podane w tabl. II-8.

4. Wannowe piece metalurgiczne

Piece wannowe są bardzo rozpowszechnione również w przemyśle metalurgicznym do wytapiania i topienia metali. Jako przykład metalurgicznego pieca wannowego rozpatrzmy piec do topienia stali systemu Siemens-Martina, przedstawiony na rys. VIII-13.

Wanna tego pieca w najniższym miejscu posiada otwór wylotowy, przez który jest wypuszczana z pieca roztopiona stal. Sklepienie 2 wy-



Rys. VIII-13. Piec do wytapiania stali systemu Siemens-Martina: 1 — sklepienie palnika, 2 — sklepienie wanny, 3 — przestrzeń robocza, 4 — konstrukcja obudowy palników, 5 — wanna, 6 — okna załadowcze, 7 — pionowy kanał powietrzny, 8 — trzon, 9 i 10 — komory pyłowe, 11 i 12 — regeneratory, 13 — tor kolejki, 14 — dolne kanały regeneratorów, 15 — przewał, 16 — sklepienie regeneratora, 17 — sklepienie (belki) dolne (rusztowe) regeneratora

konuje się z materiałów odpornych na bardzo wysokie temperatury, jak cegła chromomagnezytowa lub najwyższego gatunku cegła dynasowa. Wsad jest wprowadzany do pieca Siemens-Martina za pomocą odpowiednich urządzeń mechanicznych przez okna załadowcze 6.

Temperatura roztopionej stali w czasie wypuszczania jest bardzo wysoka i wynosi od 1550 do 1650°C. W celu doprowadzenia dostatecznej ilości ciepła do stali znajdującej się w wannie temperatura płomienia palących się gazów nad poziomem metalu powinna być jeszcze wyższa. Dochodzi ona do 1850—1900°C. Płomień przekazuje ciepło powierzchni metalu przez promieniowanie i przez bezpośredni kontakt. Poza tym otrzymuje ona ciepło na skutek promieniowania sklepienia, którego temperatura dochodzi do 1650—1680°C, czyli jest zbliżona do temperatury topnienia cegły, z której jest wykonane sklepienie.

Gazy spalinowe płyną górą. Opuszczają one komorę roboczą pieca w temperaturze 1750—1850°C. Potrzebne w piecu tak wysokie temperatury można osiągnąć tylko przy podgrzewaniu powietrza i paliwa gazowego od temperatur ok. 1000—1200°C.

Jako paliwo do ogrzewania metalurgicznych pieców Siemens-Martina stosuje się zwykle gaz generatorowy lub mieszaninę gazu koksowniczego z gazem wielkopieczowym, wyjątkowo zaś — gaz ziemny lub paliwo ciekłe.

Do ogrzewania powietrza i paliwa gazowego w piecach Siemens-Martina służą regeneratory, przy czym w przypadku ogrzewania tylko powietrza (gdy piec pracuje na paliwie ciekłym lub na gazie ziemnym) buduje się jedną parę regeneratorów, przy ogrzewaniu zaś oprócz powietrza również i paliwa gazowego ustawia się dwie pary regeneratorów.

Regeneratory znajdują się poniżej wanny i łączą się z nią za pomocą pionowych kanałów i palników. W palnikach silnie ogrzane paliwo gazowe miesza się z gorącym powietrzem. Wylatujący z nich strumień palących się gazów jest kierowany na powierzchnię roztopionego metalu w wannie i następnie przez przeciwległą parę palników płynie do regeneratorów.

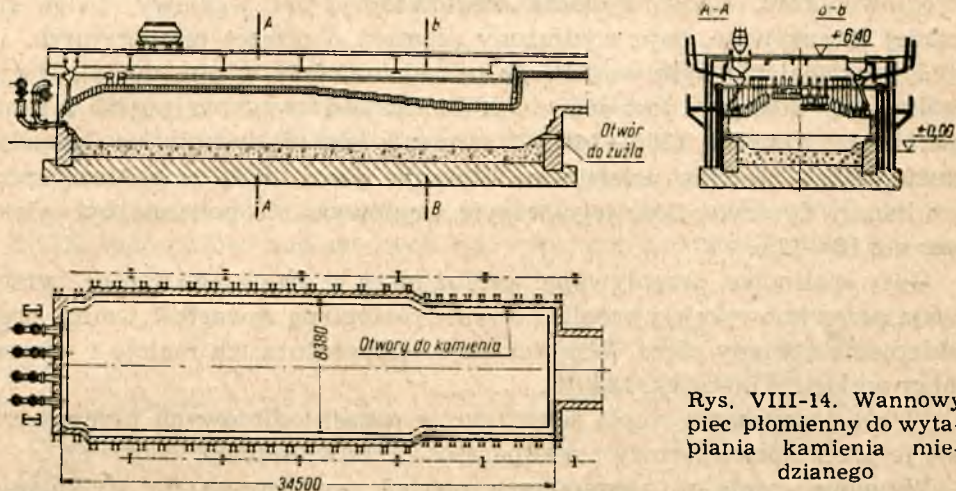
Temperatura gazów opuszczających regeneratory metalurgicznych pieców wannowych do topienia stali jest dość wysoka i wynosi od 500 do 700°C. W celu dalszego wykorzystania zawartego w nich ciepła kieruje się je do kotła parowego.

Aby zabezpieczyć najbardziej narażone na działanie wysokich temperatur części metalowe pieców Siemens-Martina, chłodzi się je za pomocą wody. W ostatnich czasach konwekcyjne chłodzenie wodne zastępuje się coraz częściej chłodzeniem odparowującym. W tym przypadku każda część chłodzona jest powierzchnią ogrzewalną wytwarzającą parę, którą następnie wykorzystuje się użytecznie do celów produkcyjnych.

Nowoczesne piece Siemens-Martina do topienia stali mają bardzo wysoką sprawność przekraczającą często 50% i dochodzącą w pewnych przypadkach do 65%, gdy w piecach dawnej konstrukcji przeciętna ich sprawność zawierała się w granicach 15—20%. Tak duży postęp tłumaczy się podgrzewaniem powietrza i paliwa gazowego do bardzo wysokich temperatur (1200°C), zmniejszeniem do minimum wszelkiego rodzaju strat

cieplnych oraz wykorzystaniem w możliwie najwyższym stopniu ciepła odpadkowego.

W przemyśle metali kolorowych (nieżelaznych) są stosowane wannowe piece płomienne do wytapiania metali lub produktów pośrednich z koncentratów rud. Jeden z takich pieców, przeznaczony do wytapiania z koncentratów rud miedzianych półproduktu, zwanego kamieniem miedzio-
wym, jest przedstawiony na rys. VIII-14. Wannę tego pieca buduje się zwykle na płycie fundamentowej o grubości 1,2—1,8 m, ściany wykonuje się z cegły dynasowej. Zabezpiecza się je przed chemicznym działaniem żuźla wykładziną z cegły magnezytowej lub chromomagnezytowej



Rys. VIII-14. Wannowy piec płomien-
ny do wytapiania kamienia
miedzianego

w miejscach, gdzie stykają się one z żuźlem. Grubość ścian nie jest na całej wysokości jednakowa, na górze wynosi ona 0,5 m, a u dołu na poziomie wanny — 0,75—1,5 m.

Sklepienia płomien-nych pieców wannowych wykonuje się z cegły dynasowej w postaci sklepienia łukowego lub jako sklepienie zawieszone z cegły magnezytowej lub chromomagnezytowej. W pierwszym przypadku grubość sklepienia wynosi 0,38—0,50 m, w drugim zaś — 0,35—0,40 m.

Surowce (wsad) są wprowadzane do pieca przez otwory w sklepieniu, przy czym urządzenie załadowcze składa się z rur stalowych lub żeliwnych, o średnicy 150—200 mm, które łączą otwory w sklepieniu ze zbiornikami nad piecem, zawierającymi surowce.

Otwory spustowe znajdują się w końcu pieca. Ciekły żuźel wypuszcza się przez otwory w ścianie poprzecznej, a kamień miedzio-
wym — przez otwory w ścianach bocznych.

Wannowe piece płomienne do wytapiania miedzi są ogrzewane paliwem o dużej wartości opałowej, najczęściej pyłem węglowym, a w krajach

bogatych w ropę naftową — paliwem płynnym, rzadziej — gazem ziemnym.

Pył węglowy doprowadza się do pieca i rozpyla się w nim za pomocą 4—6 palników umieszczonych w jego ścianie czołowej. Częstki dobrze zmielonego węgla, o wymiarach 0,05—0,07 mm, po wprowadzeniu do pieca szybko się ogrzewają i w temp. 300—500°C zaczynają wydzielać lotne węglowodory, które zapalają się w temp. 500—600°C. Pozostałe cząstki stałe, będące ziarnkami koksu, zapalają się w temp. 600—700°C. W rezultacie temperatura płomienia dochodzi do 1500—1600°C. Ażeby proces spalania pyłu węglowego był bardziej intensywny, węgiel, z którego przygotowuje się pył, powinien zawierać od 15 do 20% lotnych węglowodorów. Ubogi w lotne węglowodory pył węglowy, paląc się mniej intensywnie, daje wydłużony płomień o niższej temperaturze.

Proces spalania pyłu węglowego hamuje zawarty w nim popiół, szczególnie gdy ilość jego jest dość duża. Biorąc pod uwagę, że popiół w temperaturze powyżej 1350—1400°C zamienia się w drobniutkie kropelki żużla, które ujemnie działają na obmurze pieca, oraz że zanieczyszcza on kanały dymowe, ilość jego w pyłe węglowym nie powinna być większa niż 10—12%.

Gazy spalinowe, przepływając wzdłuż pieca w drugi jego koniec, ogrzewają przez konwekcję i promieniowanie roztopioną zawartość wanny oraz sklepienie i ściany pieca. Wskutek tego temperatura ich maleje i wynosi przy wylocie z pieca ok. 1250°C.

W celu odzyskania ciepła zawartego w gazach odlotowych przepuszcza się je przez kocioł parowy i rekuperator przeciwprądowy.

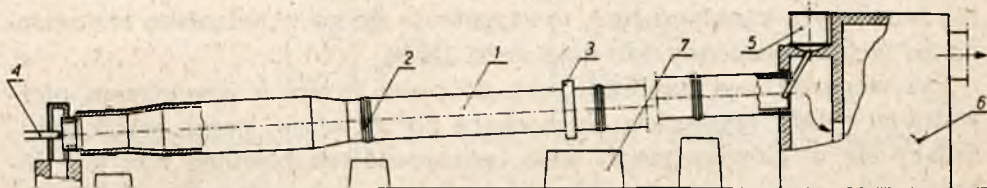
Wymiana ciepła w płomiennych piecach wannowych do wytapiania kamienia miedziowego odbywa się głównie przez promieniowanie; ogrzewanie przez konwekcję ma w nich mniejsze znaczenie. Dużą rolę w ogrzewaniu zawartości wanny spełniają sklepienie i górne, wystające z wanny części ścian. Rozżarzone do bardzo wysokiej temperatury przekazują one wannie dużo ciepła przez promieniowanie. Z tego powodu omawiane piece nazywają się czasami „refleksyjnymi”.

Sprawność cieplna wannowych pieców refleksyjnych opisanego typu (rys. IX-14) dochodzi najwyżej do 20%, sprawność zaś całej instalacji piecowej wraz z kotłem parowym i rekuperatorem wynosi od 65 do 75%.

PIECE OBROTOWE

1. Wiadomości wstępne

Piece obrotowe są obecnie najbardziej zmechanizowaną instalacją piecową do wypalania materiałów sypkich. Znalazły one szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu. Stosuje się je w przemyśle materiałów ogniotrwałych do wypalania szamotu, magnezytu i dolomitu, w przemyśle metalurgicznym do prażenia rud (np. cynkowych), w przemyśle materiałów budowlanych do wypalania cementu, gliny i wapna,



Rys. IX-1. Schemat pieca obrotowego: 1 — bęben, 2 — bandaż, 3 — koło zębate, 4 — palnik, 5 — zbiornik ze szlamem, 6 — komora pyłowa, 7 — fundamenty

w przemyśle zaś chemicznym piece obrotowe są używane w procesach prażenia, odwadniania, spiekania i redukcji.

Piece obrotowe (rys. IX-1) są to długie bębny stalowe 1, posiadające bandaż 2, którymi się opierają na rolkach (rys. IX-3), oraz koło zębate 3 otrzymujące napęd od silnika za pośrednictwem przekładni zębatej i reduktora obrotów. Wewnątrz bęben jest izolowany warstwą materiału źle przewodzącego ciepło i obmurowany cegłą ogniotrwałą. Oś pieca jest nachylona do poziomu pod niewielkim kątem α , którego wielkość waha się w granicach od 1 do 5°. Zasilanie pieca materiałem przeznaczonym do wypalania zachodzi w jego górnym końcu. Wskutek nachylenia i ruchu obrotowego bębna materiał przesypując się stopniowo posuwa się w kierunku dolnego końca pieca, gdzie następuje jego wyładowywanie poprzez dolną głowicę.

Paliwo i potrzebne do spalania powietrze są doprowadzane do pieca palnikiem 4 przez tę samą głowicę. Proces spalania przebiega w dolnym,

rozszerzonym końcu pieca. Gazy spalinowe, przepływając w przeciwnym kierunku z wypalonym materiałem, dostają się do komory pyłowej, skąd po częściowym odpyleniu są kierowane do komina.

Wymiary pieców obrotowych wahają się — zależnie od wielkości i przeznaczenia pieca — w dużych granicach. Średnice ich bębnowy wynoszą od 0,8 do 3,6 m; ostatnio zaś projektuje się piece obrotowe dla przemysłu cementowego o średnicy dochodzącej do 5 m. Długość bębnowy wynosi od 10 do 150 m lub nawet więcej. Liczba obrotów omawianych pieców nie jest duża. Waha się ona w granicach od 0,2 do 3 obr/min i rzadko bywa większa. Ilość podpór, na których spoczywa piec, zależy od jego długości i ciężaru. Dla małych pieców wystarcza podparcie na końcach, natomiast duże piece (o długości ok. 150 m) mają aż 9 podpór.

Jako paliwo w piecach obrotowych stosuje się, zależnie od temperatury, którą należy w nich osiągnąć, paliwo ciekłe, stałe i gazowe. Paliwo ciekłe (mazut) stosuje się przy wypalaniu magnezytu w temp. 1650°C, paliwo stałe w postaci pyłu węglowego — przy wypalaniu klinkieru cementowego w temp. 1400—1450°C, paliwo gazowe (gaz generatorowy) — przy wypalaniu szamotu w temp. 1300—1350°C i wapna w temp. 1200—1300°C. Jeżeli piec obrotowy jest przeznaczony do wypalania materiałów w temperaturach nie przekraczających 1000°C (np. siarczków lub magnezytu kaustycznego), to zaopatruje się go w palenisko zewnętrzne na węgiel kamienny lub koks (rys. IX-9).

Pył węglowy jest doprowadzany do pieca razem z powietrzem pierwotnym z dużą prędkością, dochodzącą do 25 m/sek, przez palnik znajdujący się w głowicy pieca. Ilość tego powietrza powinna być tak dobrana, aby wystarczyła do dobrego rozpylenia pyłu. Wynosi ona zwykle od 20 do 35% ilości powietrza, niezbędnej do zupełnego spalania paliwa. Resztę powietrza po uprzednim jego podgrzaniu doprowadza się do pieca poprzez głowicę jako powietrze wtórne.

Paliwo ciekłe doprowadza się do pieca obrotowego pod ciśnieniem ok. 25 atn za pomocą palników z rozpylaniem mechanicznym. Powietrze w tym przypadku jest wprowadzane pod ciśnieniem 250—350 mm H₂O.

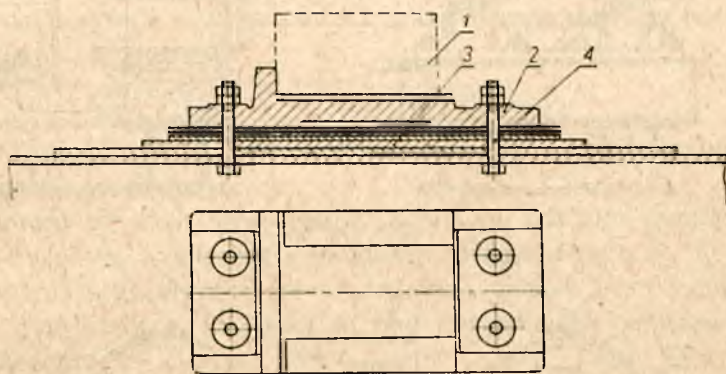
Paliwo gazowe doprowadza się do pieca obrotowego pod ciśnieniem 40—100 mm H₂O. Powietrze potrzebne do spalania należy dostarczać w taki sposób, aby można było uzyskać długi strumień palących się gazów (długi płomień). Najlepiej to można osiągnąć doprowadzając powietrze dookoła strumienia wylatującego z palnika gazu palnego.

2. Szczegóły konstrukcyjne pieców obrotowych

Bęben lub płaszcz pieca obrotowego wykonuje się ze stali o grubości od 10 do 20 mm przez spawanie lub nitowanie. Ma on tendencję (szczególnie w piecach o dużej średnicy) do spłaszczania się i przyjmowania kształtu eliptycznego. Prowadzi to do szybkiego uszkodzenia wewnętr-

nej wykładziny bębna z cegły ogniotrwałej, szczególnie w przekrojach nad podporami. Aby usztywnić w tych miejscach płaszcz pieca i zapobiec w ten sposób uszkodzeniu wewnętrznej obmurówki, nakłada się na bęben pod bandaże jedną, dwie lub nawet trzy nakładki pierścieniowe, jak pokazano na rys. IX-2. W ten sposób powstaje dostatecznie sztywny pierścień przeciwstawiający się odkształceniom bębna. W piecach cementowych o dużej średnicy takie pierścienie usztywniające robi się również i pomiędzy bandażami w części gorącej pieca.

Obmurowanie pieców obrotowych ma na celu zabezpieczenie płaszcza bębna cd nadmiernego ogrzewania się i zmniejszenie strat ciepła do otoczenia. Obmurowanie wykonuje się z cegły o kształcie klinowym z od-



Rys. IX-2. Osadzenie bandażu na piecu obrotowym: 1 — bandaż, 2 — podkładka, 3 — pierścień usztywniające, 4 — śruby

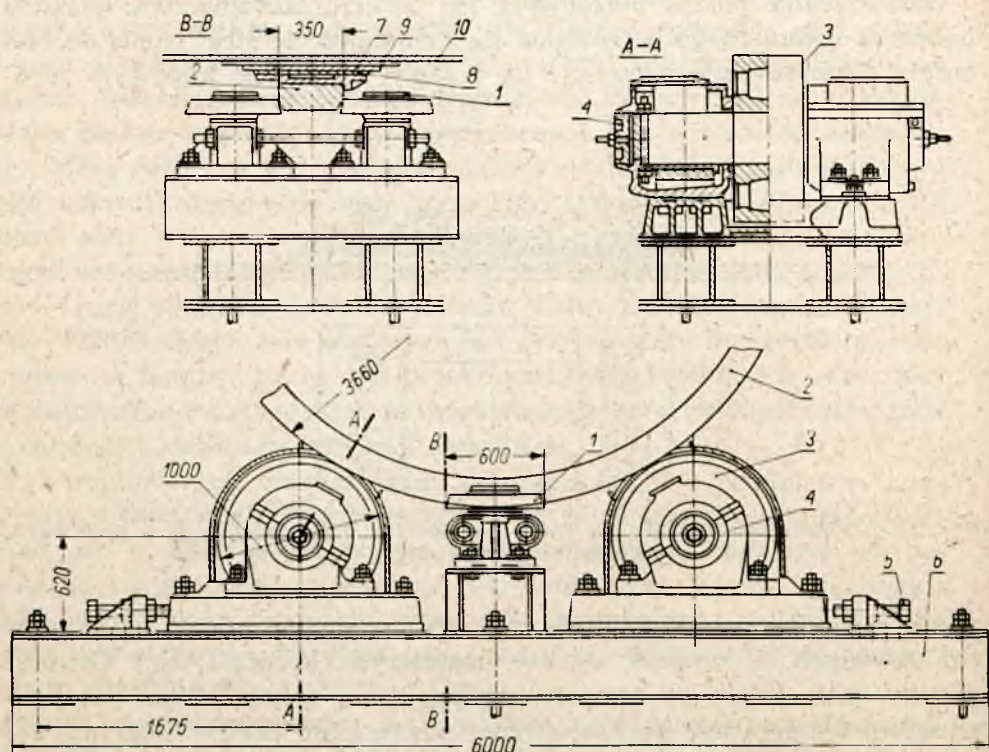
powiednich dla procesów, które zachodzą w danym piecu, materiałów ogniotrwałych (z szamotu, dynasu, magnezytu, korundu itp.). Grubość obmurowania zależy od temperatury panującej w piecu oraz od dopuszczalnej temperatury na zewnętrznej powierzchni bębna, która nie powinna przekraczać 300°C.

Dla zmniejszenia strat ciepłych umieszcza się czasami pomiędzy płaszczem bębna i obmurowaniem warstwę materiału izolacyjnego, np. azbestu o grubości 40—50 mm.

Bandaże są to obręcze stalowe, za pomocą których bęben opiera się na rolkach oporowych. Mają one przekrój prostokątny i są nałożone na bęben nie bezpośrednio, lecz za pośrednictwem specjalnych podkładek (rys. IX-2), pod którymi znajdują się omawiane poprzednio pierścienie usztywniające. Podkładki przymocowuje się do bębna śrubami, przy czym ustawia się je w taki sposób, aby boczne występy sąsiednich podkładek znajdowały się po przeciwnych stronach bandażu, co uniemożliwia osiowe przesunięcia bandaży w jedną lub w drugą stronę. Dla zmniejszenia naprężeń rozrywających, które powstają w bandażach wskutek

termicznego rozszerzania się bębna, pozostawia się pomiędzy bandażem i podkładkami niewielką szczelinę promieniową, której szerokość w czasie montażu pieca wynosi 1—2 mm.

Rolki oporowe są jedną ze składowych części konstrukcji, na której spoczywa piec obrotowy. Konstrukcja ta (rys. IX-3) składa się z płyty fundamentowej 6, do której są przymocowane łożyska 4. W łożyskach powyższych obracają się wałki wraz z osadzonymi na nich rolkami oporowymi 3. Ażeby ułatwić osiągnięcie podczas montażu takiego ustawienia



Rys. IX-3. Oparcie rolkowe pieca obrotowego: 1 — rolka wspornikowa, 2 — bandaż, 3 — rolka oporowa, 4 — łożysko rolki oporowej, 5 — śruba, 6 — płyta fundamentowa, 7 — podkładka, 8 i 9 — pierścienie usztywniające, 10 — bęben pieca

pieca obrotowego, aby równomiernie opierał się on swoimi bandażami o wszystkie rolki oporowe, łożyska tych rolek można przesuwając na płycie fundamentowej 6 w kierunku prostopadłym do osi bębna. Śruba 5 służy do ostatecznego ustalenia w czasie montażu położenia łożysk 4.

Oprócz rolek oporowych jeden z bandażów pieca obrotowego, zwykle bandaż środkowy, zaopatruje się w rolki wspornikowe, których zadaniem jest zabezpieczenie pochyło ustawionego pieca przed przesuwaniem się poosiowym. Konstrukcja oporowa, przedstawiona na rys. IX-3, posiada dwie rolki wspornikowe 1 po obu stronach bandażu 2.

Rolki oporowe i wspornikowe wykonuje się zwykle ze stali mniej twardej niż bandaże w celu zabezpieczenia bandaży od zbyt prędkiego zużycia. Rolki wykonane ze słabszego materiału szybciej się ścierają i co pewien okres czasu (mniej więcej co 2 lata) są wymieniane. Wymiana ich jest znacznie łatwiejsza i mniej kosztowna niż wymiana bandaży.

Przy rozgrzewaniu się pieca w czasie jego uruchamiania bęben się wydłuża, pociągając za sobą wszystkie bandaże oprócz środkowego, zaopatrzonego w rolki wspornikowe, który pozostaje na miejscu. Przesunięcia osiowe Δl bandaży wynoszą

$$\Delta l = \alpha l \frac{\Delta t}{100} \text{ mm}$$

gdzie:

α — współczynnik rozszerzalności liniowej, wyrażony w $\text{mm/m} \cdot 100^\circ\text{C}$

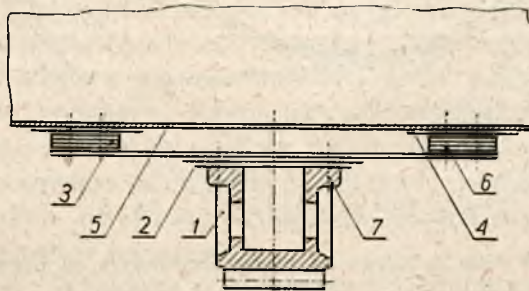
$$\alpha = 1,2 \frac{\text{mm}}{\text{m} \cdot 100^\circ\text{C}}$$

l — odległość rozpatrywanego bandaży od bandaży nieruchomego (środkowego) w m,

Δt — średni przyrost temperatury bębna na odcinku pomiędzy rozpatrywanym bandażem a bandażem nieruchomym w $^\circ\text{C}$.

Z równania tego wynika, że przesunięcia osiowe poszczególnych bandaży są tym większe, im dalej są one położone od bandaży z rolkami wspornikowymi.

Koło zębate pieca obrotowego ze względów montażowych jest zwykle dzielone. Osadzenie na długim bębnie, posiadającym wiele podpór, nie-



Rys. IX-4. Osadzenie koła zębatego na piecu obrotowym za pomocą sprężyn resorowych: 1 — koło zębate, 2 — sprężyny resorowe, 3 — podkładki, 4 — pieścieln usztywniający, 5 — płaszcz pieca, 6 — nity, 7 — śruby

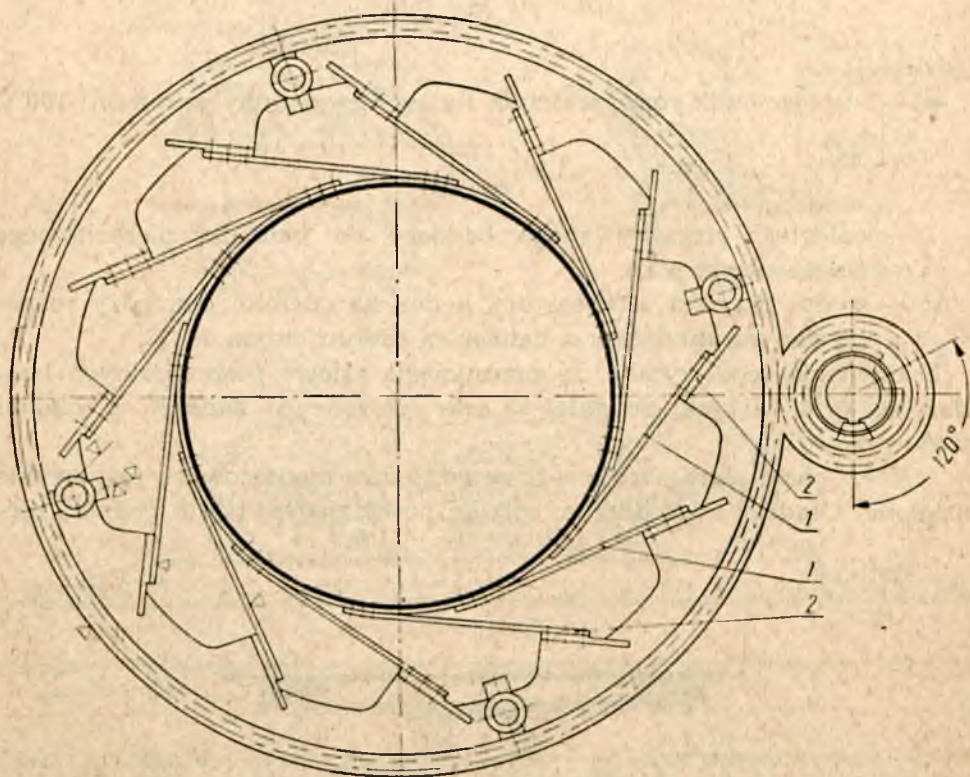
dzielonego koła zębatego jest bardzo trudne. Gdy koło zębate jest dzielone, przymocowuje się do bębna początkowo jedną jego połowę, a następnie drugą i łączy się je.

Koło zębate osadza się na piecu w sposób elastyczny, aby zabezpieczyć go przed rozsądzeniem wskutek rozszerzania się bębna przy wroście

temperatury. W praktyce stosuje się dwa rozwiązania konstrukcyjne elastycznego osadzenia koła zębatego na bębnie pieca obrotowego. Pierwsze z nich jest przedstawione na rys. IX-4, drugie zaś — na rys. IX-5.

W konstrukcji podanej na rys. IX-4 koło zębate jest osadzone na piecu za pośrednictwem sprężyn resorowych składających się z trzech lub czterech listew ze stali sprężynowej. Sprężyny powyższe ułożone są równoległe do osi bębna i opierają się końcami na podkładkach.

Drugi sposób osadzenia koła zębatego na bębnie pieca obrotowego, przedstawiony na rys. IX-5, polega na przymocowaniu go do bębna za



Rys. IX-5. Osadzenie koła zębatego na piecu obrotowym za pomocą listew sprężynujących

pomocą listew 1 ze stali sprężynowej w ilości od 8 do 12, zależnie od średnicy pieca. Listwy powyższe, styczne do powierzchni bębna, jednym końcem są przymocowane do niego, a drugim — przyśrubowane do odpowiednich nadlewów 2 znajdujących się na wewnętrznym obwodzie koła zębatego. Przy termicznym rozszerzaniu się bębna resory w pierwszej konstrukcji (rys. IX-4) oraz listwy w drugiej konstrukcji sprężynują i w ten sposób zabezpieczają koło zębate przed powstawaniem w nim zbyt dużych naprężeń.

Koła zębate należy osadzać możliwie blisko unieruchomionego rolkami wspornikowymi bandaża środkowego, aby jego przesunięcie osiowe przy wydłużeniu termicznym bębna było małe. W tym przypadku nie będzie niebezpieczeństwa wysunięcia się koła zębatego z zębátky, która go napędza, co mogłoby doprowadzić do ząbienia się tych kół nie na całej długości zębów i w związku z tym — do szybkiego zużycia kół zębatach.

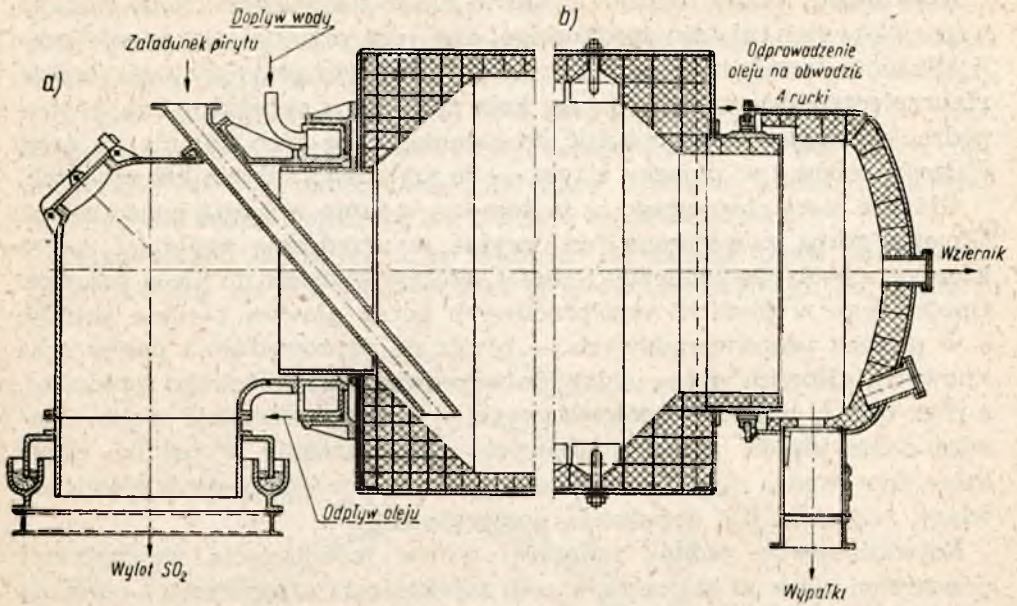
Głowice pieca obrotowego są to komory, w które wchodzi końce bębna. Głowica górna zaopatrzona jest zwykle w urządzenie zasilające, przez które w sposób równomierny i ciągły są doprowadzane do pieca surowce. Oprócz tego w piecach współprądowych górna głowica posiada palniki, a w piecach przeciwprądowych — otwór do odprowadzania gazów spalinowych. Głowica dolna służy do odprowadzania gotowego produktu, a poza tym w piecach współprądowych — do odprowadzania spalin. Głowice dolne pieców przeciwprądowych są zaopatrzone w palniki, przez które doprowadza się paliwo. W razie potrzeby umieszcza się w głowicach włazy, wzierniki itp. urządzenia pomocnicze.

Najważniejszym jednak zadaniem głowic jest izolacja wewnętrznej przestrzeni pieca od otoczenia w celu zapobieżenia przenikaniu z pieca na zewnątrz szkodliwych dla zdrowia gazów i zasysaniu do niego powietrza zewnętrznego, co obniżyłoby temperaturę wewnątrz pieca, zwiększyło zużycie paliwa i pogorszyło ciąg.

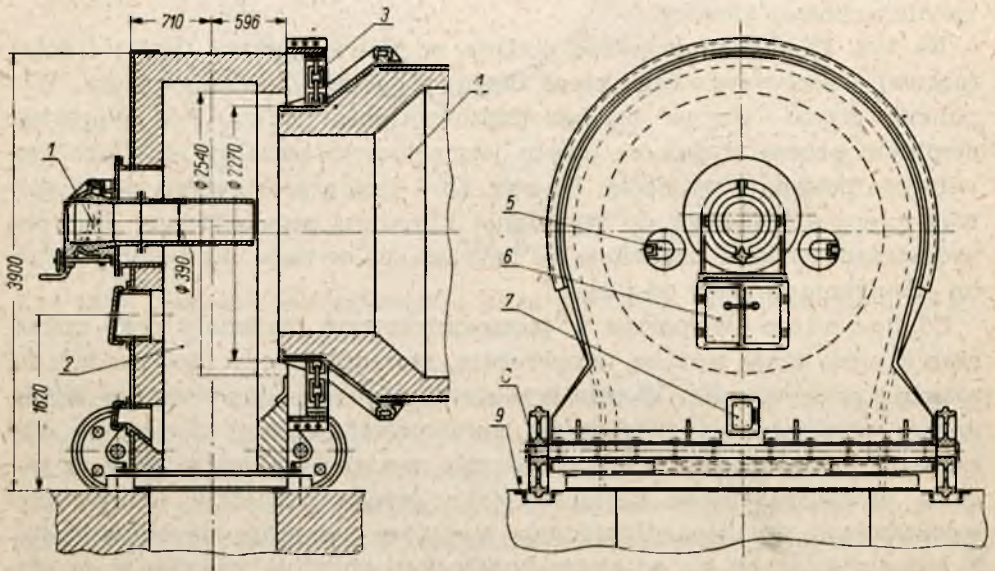
W celu uzyskania szczelności pomiędzy bębniem i głowicami miejsca, w których bębny wchodzi w głowice, są uszczelnione najczęściej za pomocą dwóch gładko obrobionych pierścieni dociskanych do siebie sprężynami. Jeden z nich znajduje się na obracającym się bębnie, a drugi — na nieruchomej głowicy.

Na rys. IX-6 jako przykład podane są głowice: górna (lewa) i dolna (prawa) przeciwprądowego pieca obrotowego do wypalania pirytu. Wypalanie pirytu odbywa się bez doprowadzania paliwa. Pod względem cieplnym proces wypalania pirytu jest samowystarczalny i dlatego głowice nie posiadają palników. Na rys. IX-7 jest przedstawiona dolna głowica pieca obrotowego do wypalania klinkieru cementowego. Jest ona zaopatrzona w koła ustawione na szynach, co w razie potrzeby pozwala na odsuwanie głowicy od pieca.

Chłodnice. Wypalone w piecu obrotowym materiały przy opuszczaniu pieca mają wysoką temperaturę, szczególnie gdy piec pracuje na zasadzie przeciwprądu. W celu wykorzystania ciepła zawartego w wypalonych produktach i zwiększenia sprawności cieplnej pieców, są one zaopatrzone w urządzenie do chłodzenia wypalonych materiałów za pomocą powietrza, które następnie jako gorące powietrze wtórne jest wprowadzane do pieca. Urządzenia powyższe nazywają się chłodnicami. Z kilku różniących się od siebie konstrukcji chłodnic najczęściej są stosowane chłodnice bębnowe i rewolwerowe, przedstawione schematycznie na rys. IX-8.

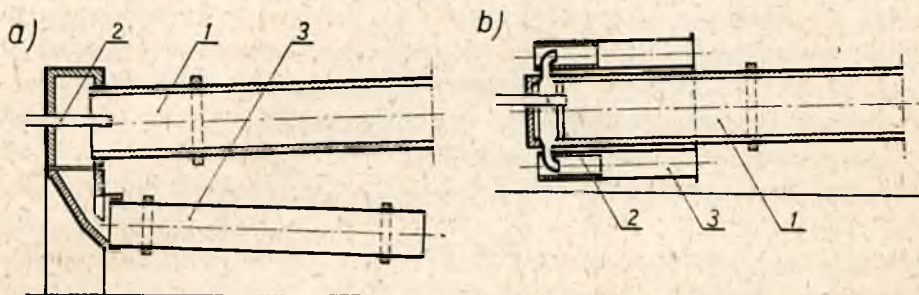


Rys. IX-6. Górna (a) i dolna (b) głowica pieca obrotowego do wypalania pirytów



Rys. IX-7. Dolna głowica pieca obrotowego do wypalania klinkieru cementowego: 1 — palnik, 2 — głowica, 3 — uszczelnienie, 4 — piec, 5 — wziernik, 6 — wiaz, 7 — otwór pomocniczy, 8 — koło, 9 — szyna

Chłodnica bębnowa pieca obrotowego (rys. IX-8a) jest to zwykle otwarty bęben stalowy o średnicy mniejszej od średnicy pieca o mniej więcej 30% i długości od kilkunastu do 30 m. Jest on ustawiony poniżej dolnego końca pieca pod kątem od 5 do 7° do poziomu i posiada własny napęd. Liczba obrotów chłodnicy jest większa od liczby obrotów pieca i wynosi od 3 do 6 obr/min. Bęben chłodnicy posiada czasami kilkanaście



Rys. IX-8. Chłodnice pieca obrotowego: a) bębnowa, b) rewolwerowa: 1 — piec, 2 — palnik, 3 — bębny chłodzące

półek na obwodzie wewnętrznym (podobnie jak suszarki bębnowe), które, przesypując wypalony materiał, przyspieszają jego chłodzenie. Powietrze przepływa przez chłodnicę w przeciwnym kierunku do studzonych materiałów i dostaje się przez dolną głowicę do strefy ogniowej pieca już ogrzane.

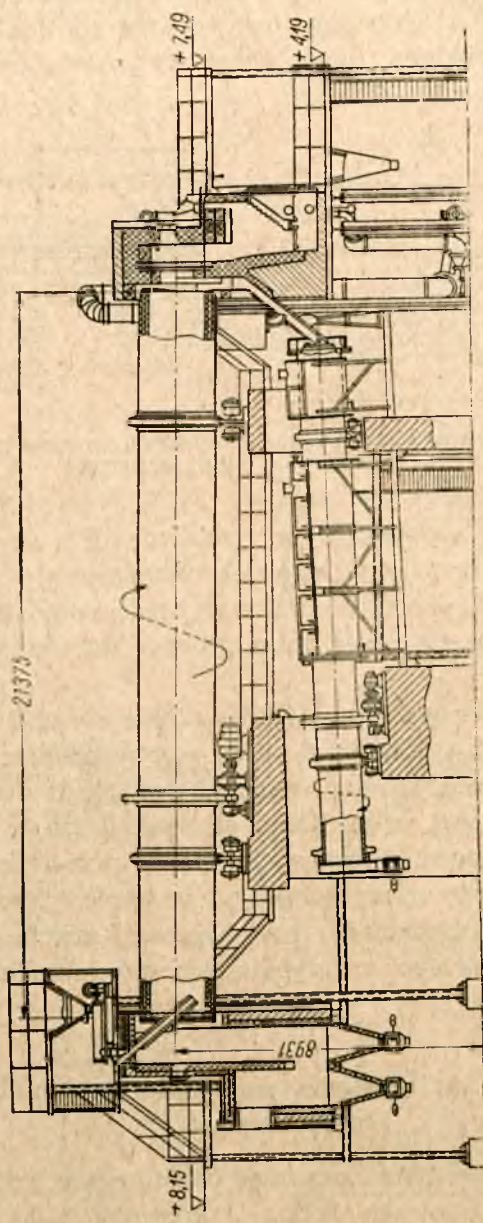
Chłodnica rewolwerowa (rys. IX-8b) składa się z 10 rur stalowych o średnicy 1,2—1,4 m i długości 6—8 m, rozmieszczonych dookoła bębna w dolnym końcu pieca. Gorący, wypalony materiał dostaje się do rur chłodnicy rewolwerowej przez dolną głowicę, która w tym przypadku obraca się wraz z piecem. Przesuwając się do przeciwległego końca rur materiał jest chłodzony przepływającym w przeciwnym kierunku powietrzem.

Stosując chłodnice bębnowe i rewolwerowe, można zaoszczędzić ok. 65—70% ciepła zawartego w wypalonych produktach opuszczających piece obrotowe.

3. Piece obrotowe do prażenia siarczków i wypalania klinkieru cementowego

Na rys. IX-9 jest przedstawiony piec obrotowy do prażenia siarczków. Składa się on ze stalowego bębna o średnicy 2100 mm i długości 21375 mm, konstrukcji podpierającej, napędu, dwóch głowic i chłodnicy bębnowej.

Bębny pieców obrotowych do prażenia siarczków obmurowuje się wewnątrz cegłą szamotową lub magnezytową. Grubość obmurowania



Rys. IX-9. Piec obrotowy do prażenia siarczków

wynosi od 200 do 300 mm. Pomiędzy obmurowaniem a płaszczem bębna znajduje się warstwa izolacji cieplnej o grubości od 10 do 30 mm.

Piec jest obracany z prędkością od 0,6 do 2 obr/min przez silnik elektryczny o mocy 40 kW za pośrednictwem reduktora obrotów i przekładni zębatej.

Dolna głowica pieca posiada palenisko półgazowe na węgiel lub inne paliwo stałe, a poza tym zaopatrzona jest w urządzenie do wyładowywania wypróżnionych siarczków (tzw. wypałków) oraz odpowiednie uszczelnienie dla zapewnienia szczelności pomiędzy nią i ruchomym bębniem.

Górna głowica jest jednocześnie komorą pyłową, w której osiada część pyłu porywanego przez gazy opuszczające bęben. Posiada ona dozownik do ciągłego i równomiernego zasilania pieca surowcem oraz podobnie jak głowica dolna jest zaopatrzona w urządzenie uszczelniające.

Omawiany piec obrotowy (rys. IX-9) pracuje na zasadzie przeciwprądu, wskutek czego wypałki opuszczające bęben mają wysoką temperaturę. Są one chłodzone powietrzem w dość długiej, stalowej, przeciwprądowej chłodnicy bębnowej napędzanej własnym silnikiem elektrycznym. Powietrze ogrzane w chłodnicy wykorzystuje się zwykle jako powietrze wtórne w palenisku półgazowym.

Największe i najbardziej nowoczesne piece obrotowe są stosowane w przemyśle cementowym do wypalania klinkieru cementowego.

Cementem nazywa się materiał uzyskany przez dokładne zmielenie klinkieru cementowego, który otrzymuje się przez silne wypalenie aż do spieczenia starannie przygotowanej i dobrze zmielonej mieszaniny wapienia i gliny zawierającej w odpowiednim stosunku CaO , SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 .

Przygotowanie mieszaniny surowców do wypalania odbywa się na mokro lub na sucho. Metoda mokra, często stosowana w polskim przemyśle cementowym, polega na tym, że mielenie i mieszanie surowców odbywa się z dodatkiem wody w ilości do 40%, tak że w rezultacie otrzymuje się jednorodny szlam. Dla zmniejszenia ilości wody w nim zawartej, a przez to dla zaoszczędzenia ciepła na jej odparowanie, stosuje się przed wprowadzeniem szlamu do pieca albo odcedzanie części wody na filtrach obrotowych, albo usuwanie nadmiaru wody w specjalnych urządzeniach przez odparowanie kosztem ciepła gazów odlotowych. Według metody suchej mielenie i mieszanie surowców odbywa się na sucho. Niewielką ilość wody (od 10 do 15%) dodaje się do suchej, surowej mączki przed samym wprowadzeniem jej do pieca, aby zapobiec porywaniu mączki przez gazy spalinowe.

Przygotowaną metodą mokrą mieszaninę w postaci szlamu kieruje się do pieca za pomocą zasilacza kubełkowego z regulowaną liczbą obrotów. W przypadku pracy metodą suchą stosuje się podwójny zasilacz ślimakowy, którego liczbę obrotów również można regulować. Za zasilaczem

ślimakowym umieszcza się w tym przypadku mieszarkę ślimakową lub bębnową, w której wskutek zwilżania suchej mączki zachodzi granulacja surowej masy przed jej wejściem do pieca.

W miarę przesuwania się w głąb pieca surowa mieszanina styka się z coraz gorętszymi gazami spalinowymi, wskutek czego ulega przemianom polegającym na: 1) suszeniu, 2) rozkładzie kaolinitu, głównego składnika gliny, w temperaturze ok. 500°C , przez co zostaje usunięta chemicznie związana woda, 3) rozkładzie węglanu wapniowego w temperaturze ok. 900°C , 4) reakcjach chemicznych wapna ze składnikami gliny w temperaturze od 1000 do 1250°C , 5) reakcjach chemicznych przebiegających pomiędzy składnikami wypalanej mieszaniny, połączonych z częściowym topieniem się składników w temperaturze od 1250 do 1400°C , ich spiekaniem się i ostatecznym wypaleniem w temperaturze powyżej 1400°C .

Produkt wypalania — klinkier cementowy — otrzymuje się w postaci twardych, zaokrąglonych kawałków. Dla otrzymania cementu poddaje się go dokładnemu zmieleniu i dodaje niewielkie ilości gipsu w celu wyregulowania szybkości wiązania.

Zasilanie obrotowego pieca cementowego surową mieszaniną odbywa się w górnym jego końcu (rys. IX-1). Wskutek pochyłego ustawienia i ruchu obrotowego bębna surowiec przesuwa się wewnątrz niego pod działaniem siły ciężkości. Przy pracy metodą mokrą umieszcza się w górnym (zimnym) końcu pieca aż do miejsca, gdzie temperatura wynosi ok. 700°C , szereg łańcuchów. Łańcuchy te zabezpieczają piec przed zalepianiem się szlamem i ułatwiają suszenie surowca, rozbijając jego obeschnięte na powierzchni grudki, a poza tym znacznie powiększają powierzchnię wymiany ciepła pomiędzy gazami spalinowymi a znajdującymi się w tej strefie pieca materiałami. Wskutek tego gazy spalinowe energicznie oddają zawarte w nich ciepło i opuszczają cementowy piec obrotowy, zaopatrzony w łańcuchy, o stosunkowo niskiej temperaturze ($150\text{—}200^{\circ}\text{C}$), przez co znacznie zmniejsza się zużycie (od 5 do 10%) ciepła i paliwa.

Łańcuchy w piecu obrotowym przymocowuje się dwoma sposobami: albo jednym końcem pocięte na krótkie odcinki długości ok. 0,6 średnicy pieca, albo jako dłuższe odcinki przyłączone do pieca dwoma końcami i zwisające w postaci łuków (girland). Drugi sposób daje nieco lepsze wyniki technologiczne dopóty, dopóki jeden z końców łańcucha nie oderwie się. Gdy to nastąpi, to łańcuch płącze się z łańcuchami sąsiednimi, co wpływa ujemnie na pracę pieca.

Długość strefy łańcuchowej pieca cementowego waha się w granicach od 10 do 20% całkowitej jego długości, przy czym w piecach długich strefa łańcuchowa jest procentowo dłuższa niż w krótkich.

Łańcuchy stawiają dość duży opór hydrauliczny przepływającym przez piec gazom. Opór ten stanowi ok. 80% całkowitego oporu pieca obrotowego. Wynosi on, w przeliczeniu na 1 m długości strefy łańcuchowej,

przy zawieszeniu łańcuchów dwoma końcami po linii śrubowej od 2,0 do 2,8 mm H₂O, przy zawieszeniu łańcuchów jednym końcem po linii śrubowej — od 0,8 do 2,0 mm H₂O, a przy szeregowym zawieszeniu łańcuchów jednym końcem — tylko od 0,6 do 0,8 mm H₂O. Chociaż, jak wynika z powyższych liczb, szeregowe zawieszenie łańcuchów stawia mniejszy opór, stosuje się je jednak rzadko, ponieważ efekt takiego zawieszenia jest słabszy niż zawieszenia po linii śrubowej lub w szachownicy.

Strefa wypalania w obrotowych piecach cementowych, w której panuje najwyższa temperatura (ok. 1500°C), posiada (jak widać na rys. IX-1) większą średnicę niż pozostałe strefy pieca, wskutek czego prędkość posuwania się wypalanego materiału jest w niej wolniejsza, a czas przebywania — dłuższy. Przez powiększenie średnicy strefy wypalania osiąga się poza tym zwiększenie objętości strefy spalania paliwa. W ten sposób powiększa się również ilość energii cieplnej uzyskiwanej w jednostce czasu oraz polepszają się warunki wymiany ciepła. Polepszenie to jest spowodowane wzrostem powierzchni wymiany i grubości warstwy gazów spalinowych promieniujących ciepło. Wydajność pieców cementowych z rozszerzoną strefą spalania jest wskutek tego znacznie wyższa (w niektórych przypadkach do 30%) niż w piecach obrotowych o stałej średnicy, a poza tym uzyskuje się klinkier lepiej wypalony i osiąga się mniejsze zużycie paliwa (od 5 do 12%) na 1 t produktu.

Gazy spalinowe opuszczające obrotowy piec cementowy unoszą dużo pyłu, ponieważ wypalany materiał silnie się ściera. Ilość powstającego pyłu jest tym większa, im dłuższy jest piec. Aby zmniejszyć straty materiałowe oraz zabezpieczyć otoczenie przed zanieczyszczeniem pyłem, gazy spalinowe na drodze do komina są poddawane odpyleniu.

Jako urządzenia odpylające stosuje się komory pyłowe oraz cyklony i elektrofiltry. Górna głowica cementowego pieca obrotowego łączy się w tym celu z komorą pyłową, w której gazy spalinowe pozostawiają ok. 60%, a czasami i więcej zawartego w nich pyłu. Dalsze oczyszczanie w razie potrzeby zachodzi w cyklonach, multicyklonach lub w odpylaczach elektrostatycznych.

Gazy opuszczające cementowe piece obrotowe zawierają sporo ciepła, szczególnie przy pracy na sucho. Część tego ciepła po uprzednim odpyleniu gazów można odzyskać w kotłach parowych.

W ostatnich latach przed drugą wojną światową zaczęto wykorzystywać gazy odlotowe z pieców cementowych do podsuszania i podgrzewania doprowadzanych do pieców surowców. W tym celu rozpryskiwano szlam w górnym końcu pieca przed jego strefą łańcuchową. Stosowano przy tym rozpylacze dyszowe pracujące pod ciśnieniem od 6 do 8 at. W rezultacie uzyskiwano wzrost wydajności pieca obrotowego do 10% oraz oszczędność paliwa do 5%. Ujemną stroną tego rozwiązania było dość częste zapychanie się dysz oraz porywanie przez gazy dużych ilości pyłu.

Dalszym postępowaniem w dziedzinie wykorzystywania ciepła odpadowego, zawartego w gazach odlotowych, było zastosowanie odparowaczy bębnowych, w których część wody zawartej w szlamie przed jego wprowadzeniem do pieca odparowuje się kosztem ciepła gazów odlotowych. Wydajność pieca przez to powiększa się o 25—30% w porównaniu z wydajnością pieców bez urządzeń do odzyskiwania ciepła zawartego w gazach.

PIECE RETORTOWE, MUFLOWE I PIECE Z ATMOSFERĄ OCHRONNĄ

1. Wiadomości wstępne

Gdy zachodzi konieczność oddzielenia materiałów przerabianych w piecu od gazów spalinowych w celu zabezpieczenia przed rozcieńczeniem gazowych produktów reakcji zachodzących w piecu (jak w przypadku rozkładowej destylacji węgla lub prażenia blendy cynkowej) albo w celu zabezpieczenia ogrzewanych w piecu przedmiotów przed szkodliwym działaniem spalin lub powietrza (jak w przypadku wypalania przedmiotów porcelanowych lub przy termicznej i termochemicznej obróbce wyrobów metalowych), wówczas stosowane są piece retortowe, muflowe i piece z atmosferą ochronną. Jeżeli przedmioty poddawane obróbce cieplnej (np. wypalaniu) są drobne, umieszcza się je w specjalnych skrzynkach ceramicznych lub metalowych, czyli w tzw. kapslach, które pełnią rolę mufl, i wypala w zwykłych piecach komorowych.

Ścisłą granicę pomiędzy piecami retortowymi i muflowymi trudno jest przeprowadzić. Przyjęto nazywać piecami „retortowymi” takie piece, w których materiały są poddawane obróbce cieplnej głównie w celu uzyskania cennych gazów lub par, a piecami „muflowymi” — takie piece, w których zachodzi głównie ogrzewanie i wypalanie obrabianych materiałów. Należy jednak zaznaczyć, że podział ten jest tylko orientacyjny. W wielu piecach, które zalicza się do pieców muflowych, wydzielają się również cenne gazy, przerabiane w dalszym biegu procesu technologicznego.

Typowymi przedstawicielami pieców retortowych są piece gazownicze i koksownicze, w których prowadzi się termiczny rozkład węgla w celu uzyskania gazu węglowego lub koksu hutniczego.

Proces termicznego rozkładu węgla, czyli piroliza, zachodzi w czasie ogrzewania węgla bez dostępu powietrza w zamkniętym naczyniu, zwanym retortą lub komorą. W pewnym uproszczeniu proces ten można przedstawić w sposób następujący: w miarę dopływu ciepła i wzrostu temperatury z węgla wydobywają się okludowane w nim gazy (H_2O , CO_2 i CH_4). W temp. $250^\circ C$ oprócz gazów okludowanych wydziela się również

CO, a w temp. 270—280°C pojawiają się pary węglowodorów, co wskazuje na rozpoczęcie się procesu rozkładu węgla. Przebiega on energiczniej w granicach temperatur 300—400°C. Wydzielają się wtedy węglowodory, które po skropleniu tworzą smołę. Jednocześnie powstają takie substancje, jak woda, metan, dwutlenek i tlenek węgla, węglowodory nienasycone i parafinowe. Przed osiągnięciem temp. 400°C wydziela się 70% smoły, pozostała jej część powstaje w czasie ogrzewania do temp 500°C.

Niektóre gatunki węgla po osiągnięciu temp. 350—380°C przechodzą w stan plastyczny, a wydzielające się obficie gazy i pary powodują wydymanie i pęcznienie masy węglowej. W miarę dalszego rozkładu, wskutek wzrostu temperatury, następuje stopniowe twardnienie półstopionego węgla i tworzy się tzw. półkoks o typowej strukturze koksu.

Powyżej temp. 550°C przestaje wydzielać się smoła, natomiast półkoks ulega dalszemu rozkładowi; wydzielając produkty gazowe, półkoks przy tym przechodzi stopniowo w koks. Jednocześnie w miarę wzrostu temperatury produkty rozkładu węgla ulegają różnego rodzaju bardzo skomplikowanym reakcjom chemicznym, tak że pierwotne produkty pirolizy przekształcają się w produkty wtórne, takie jak benzen, naftalen, antracen, oraz powstają nowe ilości metanu, wodoru i koksu.

Z powyższego, bardzo uproszczonego opisu procesu termicznego rozkładu węgla wynika, że wskutek tego rozkładu powstają produkty stałe, ciekłe i gazowe.

Jako produkt stały otrzymuje się koks, zawierający niewiele części lotnych, lub półkoks, jeżeli ogrzewanie doprowadzić tylko do temp. 650°C.

Produkty ciekłe stanowią: smoły — gazownicza i koksownicza, woda amoniakalna, powstała wskutek oddestylowania wilgoci zawartej w węglu i na skutek reakcji zachodzących w retorcie w czasie biegu procesu, oraz benzol surowy otrzymywany przez wymycie go z produktów gazowych.

Produkty gazowe są to gazy palne, a mianowicie: gaz węglowy, zwany dawniej gazem świetlnym, gaz koksowniczy i różne rodzaje gazów wytłenych powstałych przy prowadzeniu procesu termicznego rozkładu węgla w niskich temperaturach (do 650°C).

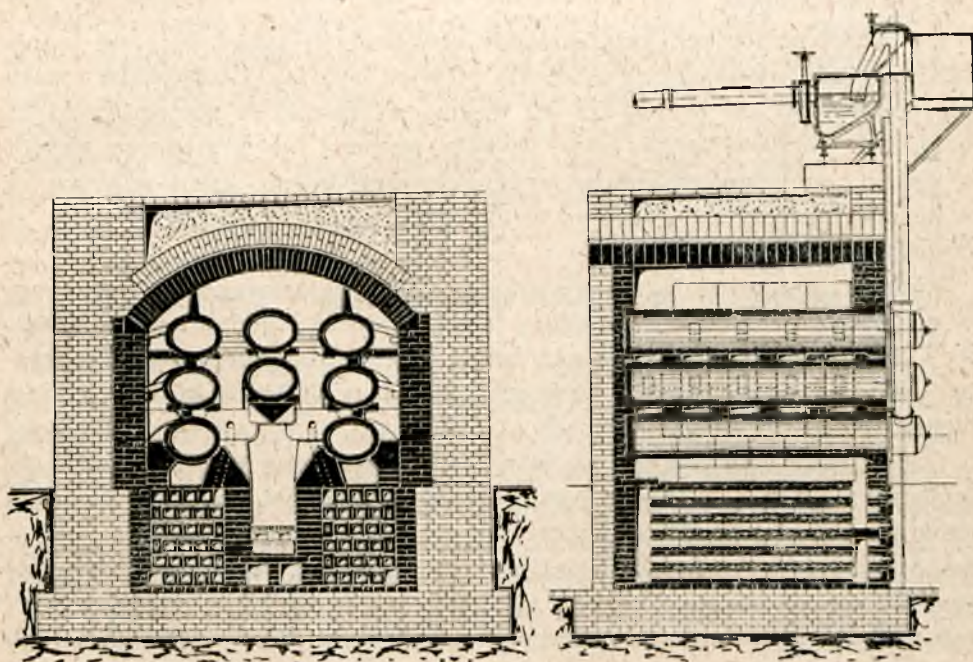
Ilość głównych produktów, powstałych z termicznego rozkładu węgla, jak gazu, koksu i smoły, oraz ich skład zależą od składu chemicznego i gatunku węgla, od warunków prowadzenia procesu, a szczególnie — od końcowej jego temperatury.

Termiczny rozkład węgla w wysokich temperaturach (900—1000°C) prowadzi się w przemyślach — gazowniczym i koksowniczym. W gazownictwie głównym celem produkcji jest gaz stosowany obecnie jako paliwo w gospodarstwie domowym i czasami w przemyśle. Koks, będący produktem ubocznym, znalazł zastosowanie jako dobry materiał opałowy, a smoła gazownicza — drugi produkt uboczny — jest cennym surowcem dla przemysłu organicznego.

Początkowo przemysły gazowniczy i koksowniczy rozwijały się jako dwie odrębne gałęzie przemysłu, obecnie pomimo odmiennych urządzeń produkcyjnych różnica pomiędzy gazownictwem a koksownictwem stopniowo się zaciera. Obydwie bowiem gałęzie przemysłu chemicznego są oparte na tym samym procesie technologicznym — termicznego rozkładu węgla w wysokich temperaturach (ok. 1000°C), a głównymi produktami rozkładu w obu przypadkach są: gaz, koks i smoła, o podobnych składach chemicznych.

2. Piece retortowe (gazownicze i koksownicze)

Piecy gazownicze. Podstawową jednostką produkcyjną gazowni jest piecownia. W ciągu przeszło 150 lat rozwoju przemysłu gazowniczego stosowano kilkadziesiąt odmian pieców retortowych. Piecy te ze względu



Rys. X-1. Piec gazowniczy o retortach poziomych

na charakter pracy można podzielić na piecy o działaniu okresowym i o działaniu ciągłym, a ze względu na budowę — na piecy poziome, pochyle i pionowe.

Piecy o retortach poziomych są stosowane do dnia dzisiejszego w licznych małych i średnich gazowniach. Najbardziej są rozpowszechnione piecy o 8 (rys. X-1) lub 9 otwieranych z jednej strony retortach, połączone bezpośrednio z generatorem oraz posiadające urządzenie rekupera-

cyjny umieszczone po obu jego bokach. Długość retort w tych piecach waha się od 2,5 do 3,0 m, długość zaś retort otwieranych z obu stron jest większa i dochodzi nawet do 6 m. Długie retorty nie są jednolite, lecz składają się z kilku części łączonych ze sobą przy budowie pieca.

Ponieważ retorty pracują w wysokich temperaturach, należy je wykonywać z materiałów ogniotrwałych posiadających temperaturę topnienia ponad 1750°C , niski współczynnik rozszerzalności cieplnej, dobre przewodnictwo cieplne, znaczną wytrzymałość mechaniczną i dostateczną odporność chemiczną. Przed pierwszą wojną światową powszechnie stosowano retorty szamotowe, a obecnie przeważnie wykonuje się retorty z kształtek krzemionkowych.

Przekrój poprzeczny retort jest najczęściej owalny (rys. X-1), o wymiarach wewnętrznych osi 525×380 , 525×315 i 430×350 , rzadziej okrągły lub w kształcie litery D, przy czym grubość ich ścian wynosi zwykle 60—65 mm.

Do retort poziomych jednostronnie otwieranych załadowuje się jednorazowo przez wystające na zewnątrz głowice (rys. X-1), zamykane szczelnie pokrywami, od 150 do 250 kg węgla, najczęściej za pomocą prostych urządzeń mechanicznych. Czas trwania procesu nie przekracza zwykle 4 godzin, po czym następuje wyładowywanie koksu, które odbywa się w sposób mechaniczny, albo — w mniejszych koksowniach — ręcznie za pomocą odpowiednich haków.

Retorty ogrzewa się przez spalanie gazu generatorowego wytwarzanego w generatorze stanowiącym jedną całość z piecem (generator wbudowany). Gazy spalinowe po ogrzaniu retort przechodzą przez dwa rekuperatory znajdujące się po obu stronach pieca (rys. X-1), w których oddają ciepło powietrzu potrzebnemu do spalania.

Gazy i pary wydzielające się w retorcie stykają się z rozżarzonymi jej ścianami i ulegają dalszemu termicznemu rozkładowi, wskutek czego na wewnętrznej powierzchni retorty osiada pochodzący z rozpadu węglowodorów grafit retortowy. Ponieważ powoduje on stopniowe zwężanie swobodnego przekroju retorty i jest złym przewodnikiem ciepła, retorty muszą być co pewien czas poddawane odgraitowaniu.

Ogrzewanie retort w piecu przedstawionym na rys. X-1 nie jest jednakowe. Dolne retorty są narażone na większe wahania temperatur i dlatego powstający w nich koks jest mniej jednorodny. Jest on używany w stanie gorącym do zasilania generatora obsługującego piec. Koks otrzymywany z retort dwóch górnych rzędów jest znacznie lepszy, ponieważ jest równomierniej odgazowany, dobrze porowaty i zwarty. Znajduje on chętnych nabywców jako dobry materiał opałowy do pieców stosowanych do centralnego ogrzewania oraz do niektórych pieców przemysłowych.

Wydzielające się w retortach pary i gazy dostają się rurą żeliwną do odbieralnika umieszczonego nad piecem. W odbieralniku kondensuje się

woda amoniakalna i smoła, a gaz węglowy kieruje się do dalszego chłodzenia i oczyszczania.

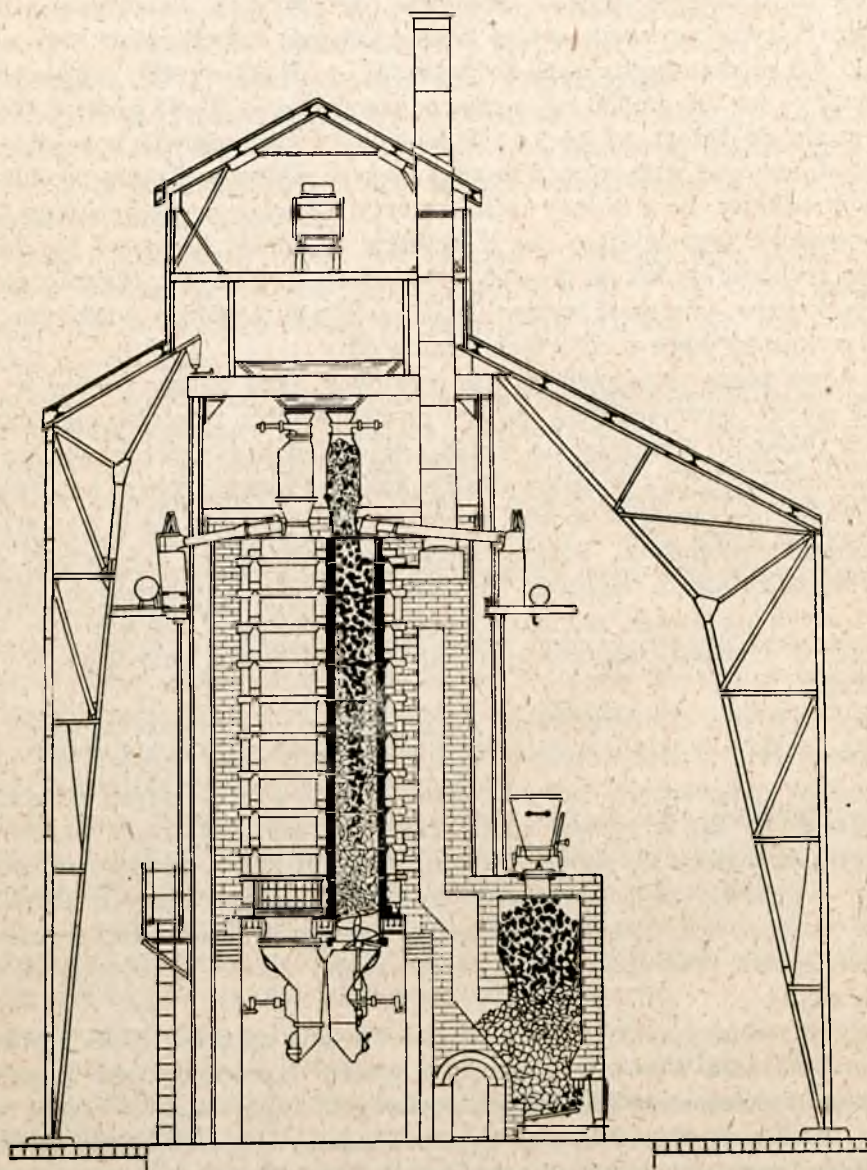
Piece gazownicze o retortach pochyłych, otwieranych na obu końcach i rozszerzających się nieco ku dołowi, zaczęto budować w ostatnim dziesięcioleciu ubiegłego wieku; łatwiejsze jest w nich ładowanie retorty węglem i wyładowywanie z niej koksu. Długość takich retort wynosi od 3,5 do 6,5 m, kąt nachylenia do poziomu — od 32 do 42°, jednorazowy ładunek — od 300 do 650 kg, a czas odgazowania — 9—12 godzin. Węgiel ładuje się do retort od góry, a koks po otwarciu głowic wysypuje się z nich dołem pod wpływem własnego ciężaru. Odprowadzanie produktów lotnych odbywa się z dolnej części retorty. Chociaż w piecach tego typu węglowodory wydzielające się w retorcie są mniej narażone na dalszy proces rozkładowy niż w piecach o retortach poziomych, obecnie nie są one budowane, ponieważ wszystkie ich zalety w znacznie większym stopniu wykazują piece o retortach pionowych.

Pionowe piece retortowe można traktować jako dalszy postępek w budowie pieców gazowniczych, mający na celu oprócz zmniejszenia zużycia paliwa również i zmniejszenie wkładu pracy ludzkiej przez łatwiejsze załadowywanie węgla i wyładowywanie koksu. Pierwsze piece z retortami pionowymi pracowały w sposób okresowy podobnie jak piece z retortami poziomymi i pochyłymi. Później zaczęto budować piece z retortami pionowymi o działaniu ciągłym. Z kilku konstrukcji pionowych pieców retortowych na uwagę zasługuje często spotykany w Europie i w Polsce piec o działaniu ciągłym systemu Glover-Westa, przedstawiony na rys. X-2.

Piece systemu Glover-Westa mają zwykle po 8 rozszerzających się ku dołowi retort eliptycznych o wysokości 7620 mm. Napędzają się one ze zbiorników ustawionych nad retortami. Węgiel drobniejszych sortymentów przesuwany jest w sposób ciągły pod wpływem własnego ciężaru do retorty. Obracający się ślimak usuwa z dołu retorty — również w sposób ciągły — gotowy koks, kierując go do zbiorników chłodzących. Prędkość ruchu obrotowego ślimaków można w pewnych granicach regulować i w ten sposób dostosowywać prędkość ruchu wsadu w retorcie do gatunku węgla.

Przerób jednej retorty wynosi ok. 4,5 t węgla na dobę. Koks z pieców systemu Glover-Westa jest bardziej kruchy i porowaty niż z pieców o działaniu okresowym i komorach poziomych. Wpływa na to ciągły ruch węgla i koksu w komorze oraz doprowadzanie w sposób ciągły od dołu do retorty pary w celu chłodzenia koksu. Para nie tylko chłodzi, ale powoduje również zgazowanie pewnej części koksu, przez co uzyskuje się z każdej retorty ok. 2000 m³ gazu, który można traktować jako mieszaninę gazów pochodzących: a) z termicznego rozkładu węgla (gaz węglowy) i b) ze zgazowania koksu parą (gaz wodny). Wartość opałowa gazu z pieca systemu Glover-Westa jest wobec tego niższa niż z pieców o re-

tortach poziomych i wynosi od 4500 do 4800 kcal/Nm³. Jakość i ilość smoły węglowej oraz jej skład chemiczny są natomiast znacznie korzystniejsze, ponieważ lotne węglowodory w pionowych retortach ulegają rozkładowi w mniejszym stopniu niż w retortach poziomych.



Rys. X-2. Piec gazowniczy systemu Glover-Vesta

Do ogrzewania pieców systemu Glover-Vesta stosuje się gaz generatorowy doprowadzany zwykle do 9 palników rozmieszczonych dookoła retorty jeden powyżej drugiego. Potrzebne do spalania powietrze pod-

grzewa się do temp. 350—400°C w urządzeniu do chłodzenia koksu, a następnie do temperatury ok. 700°C, wykorzystując ciepło chłodzenia generatora.

Bieg procesu termicznego rozkładu węgla w pionowych retortowych piecach systemu Glover-Westa nie wymaga równomiernej temperatury wzdłuż całej wysokości retorty, ponieważ węgiel i powstający w retorcie półkoksi oraz koks są w nieprzerwanym ruchu i każda część wsadu przechodzi w retorcie stopniowo — posuwając się w dół — przez kolejne stadia termicznego rozkładu. W związku z tym utrzymuje się w piecu niejednakowa temperatura na różnych wysokościach. Najwyższą temperaturę (ok. 1300°C) posiadają ściany retort na dole, najniższą zaś (ok. 800°C — na górze. Poszczególne fazy termicznego rozkładu węgla rozdzielone są w retortach tego pieca przestrzennie od siebie. Gdy koks przesuwają się do strefy o temp. 1000°C nie zawiera już substancji smołotwórczych, gaz zaś nie ma wówczas węglowodorów ciężkich.

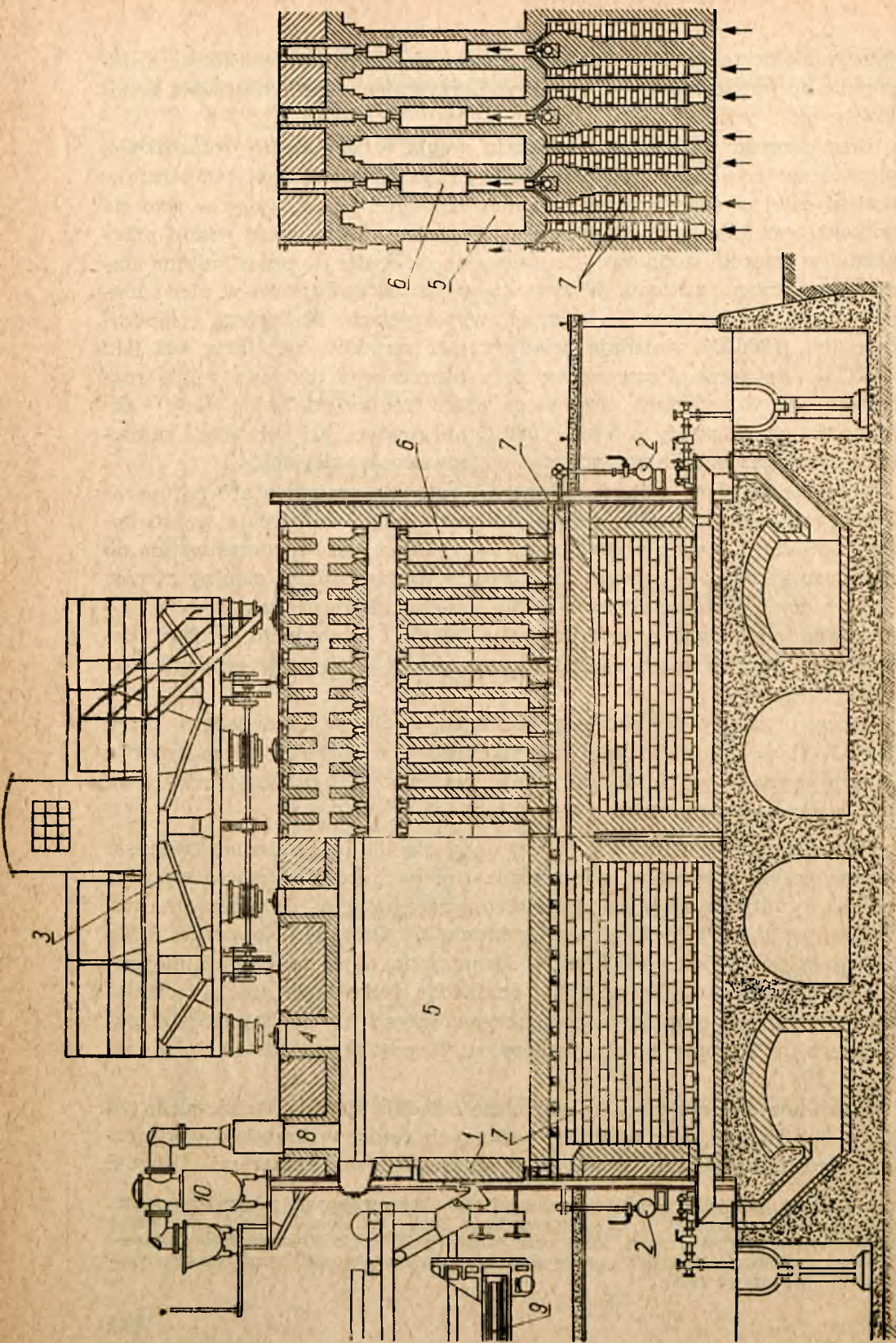
Nowoczesne piece systemu Glover-Westa nie posiadają ani rekuperatorów, ani regeneratorów, gorące zaś gazy spalinowe kieruje się do kotłów parowych w celu wytwarzania pary, która jest wykorzystywana do zgazowania koksu na samym dole retorty. Ogólny bilans cieplny pieców gazowniczych systemu Glover-Westa wraz z kotłem parowym jest w porównaniu z piecami o retortach poziomych i pochyłych bardziej korzystny, a zużycie koksu na 100 kg przerobionego węgla wynosi tylko od 10 do 12 kg.

Lotne produkty termicznego rozkładu węgla w omawianym piecu (rys. X-2) są odprowadzane do odbieralnika z górnego końca retorty. Otrzymywana w odbieralniku smoła jest zwykle bardziej wartościowa niż wytwarzana w piecach z retortami poziomymi.

Piecki koksownicze. W ciągu prawie 200 lat istnienia przemysłu koksowniczego stosowano w nim piece o różnych konstrukcjach, zaczynając od prymitywnych pieców mielerzowych i ulowych, a kończąc na nowoczesnych bateryjnych piecach systemu C. Otto, H. Koppersa, Stilla i Giprokksa. Biorąc pod uwagę ograniczoną objętość i cel niniejszej książki, poniżej zostanie pokrótce omówiona tylko konstrukcja i działanie stosowanych obecnie pieców koksowniczych na tle najczęściej spotykanego w Europie pieca systemu H. Koppersa, przedstawionego na rys. X-3¹⁾.

Stosowane obecnie piece koksownicze składają się z kilkunastu (od 30 do 80) długich, lecz wąskich, poziomych retort w kształcie wydłużonego prostopadłościanu, zwanych w koksownictwie komorami. Długość

¹⁾ Bardziej szczegółowe wiadomości o piecach koksowniczych w języku polskim można znaleźć w książce E. Kwiatkowskiego: Zarys technologii chemicznej węgla kamiennego (PWT. Warszawa 1954) oraz w pracy B. Rogi: Koksownictwo, gazownictwo i wytłewanie (rozdział I pracy zbiorowej pt. Technologia chemiczna organiczna. PWN. Warszawa 1957).



Rys. X-3. Piec koksowniczy systemu H. Koppersa: 1 — drzwi przednie, 2 — rury do doprowadzania paliwa gazowego, 3 — zasypnica, 4 — otwór zasypowy, 5 — komora, 6 — kanały grzewcze, 7 — otwór do odprowadzania lotnych produktów koksowania, 8 — koniec wypycharki, 9 — odbieralnik, 10 — odbieralnik.

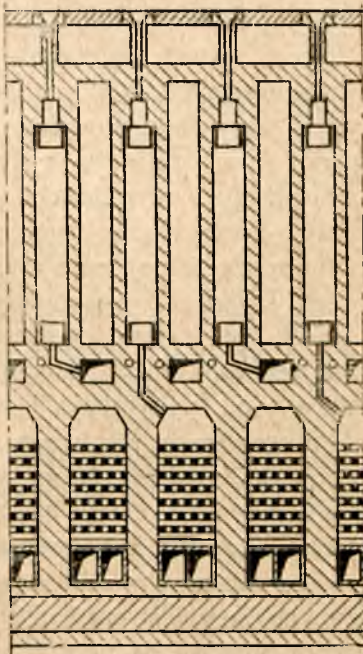
ich w zależności od konstrukcji i wielkości pieca waha się w granicach od 7 do 13,5 m, wysokość — od 1,8 do 4,5 m, a szerokość — od 0,35 do 0,45 m. Pomiedzy komorami zawierającymi węgiel poddawany termicznemu rozkładowi znajdują się komory grzewcze (rys. X-3) złożone z szeregu pionowych kanałów. W kanałach tych spala się paliwo gazowe (gaz koksowniczy, wielkopiecowy lub generatorowy). Ogrzewanie każdej komory odbywa się wobec tego w sposób przeponowy z obu jej stron.

Gorące gazy spalinowe są kierowane do regeneratorów, które znajdują się pod komorami, przy czym piece ogrzewane paliwem wysokokalorycznym (gaz koksowniczy) posiadają zwykle pod każdą komorą tylko dwa regeneratory (jeden z przodu, drugi z tyłu) do podgrzewania powietrza (rys. X-4). W przypadku gdy piece koksownicze są ogrzewane gazem o niskiej wartości opałowej (gazem wielkopiecowym lub generatorowym), pod każdą komorą znajdują się cztery regeneratory (rys. X-3), z których jedna para jest przeznaczona do podgrzewania powietrza, a druga — do podgrzewania paliwa gazowego.

Piece koksownicze buduje się obecnie z cegły krzemionkowej. Można jeszcze spotkać piece starszego typu, wykonane z cegły szamotowej. Cała konstrukcja ceramiczna pieca jest wzmocniona szkieletem stalowym składającym się ze stalowych stojaków kotwicznych, poprzecznych i podłużnych ściągaczy oraz stalowych ram (futryn) do drzwi piecowych. Zbrojenie, podobnie jak w każdym piecu, ma na celu ochronę obmurowania przed powstawaniem szczelin wskutek jego rozszerzania się i kurczenia przy zmianach temperatury oraz umożliwia przymocowanie ram do drzwi znajdujących się na obu końcach każdej komory. Drzwi te są wykonywane ze stali i wykładane od strony wewnętrznej cegłą szamotową.

W sklepieniu pieca znajdują się otwory, przez które zasypuje się do komór węgiel, i otwory wizerne do każdego kanału grzewczego, a poza tym każda komora jest połączona rurą żeliwną o odpowiedniej średnicy z odbieralnikiem znajdującym się nad piecem prostopadle do osi komór (rys. X-3).

Wprowadzanie węgla do komór, w których zachodzi jego koksowanie, odbywa się albo od góry przez otwory zasypowe, albo z przodu przez otwarte drzwi komory. Do załadowania przez otwory w sklepieniu służy



Rys. X-4. Przekrój poprzeczny pieca koksowniczego systemu H. Koppersa, na paliwo wysokokaloryczne

specjalne urządzenie mechaniczne, zwane zasypnicą, posiadające kilka zasobników napełnionych odpowiednio rozdrobnionym węglem w ilości wystarczającej do załadowania jednej komory. Zasypnica porusza się, jak przedstawiono na rys. X-3, na piecu po szynach i może być ustawiona nad każdą komorą koksowniczą. Zasobniki jej łączy się za pomocą rur teleskopowych z otworami zasypowymi komory i po otwarciu odpowiednich zasuw węgiel zsypuje się do niej pod wpływem własnego ciężaru. Po załadowaniu komory poziom węgla w niej wyrównuje się za pomocą drążka, który jest wsuwany do komory przez otwór w górnej części drzwi. Mechanizm do poruszania tego drążka znajduje się na urządzeniu do wypychania z komory gotowego koksu.

Drugi sposób ładowania komór węglem stosuje się w koksowniach przerabiających węgle o gorszych własnościach koksowniczych. Polega on na wprowadzeniu przez otwarte drzwi komory odpowiednio uformowanej przez ubijanie bryły węgla posiadającej kształt długiego prostopadłościanu o wymiarach dostosowanych do wymiarów komory koksowniczej. Formowanie bryły oraz wsuwanie jej do komory odbywa się za pomocą specjalnej maszyny, zwanej wsadnicą. Porusza się ona na szynach przed komorami koksowniczymi w kierunku prostopadłym do ich osi i może być ustawiona przed każdą z nich. Wsadnica posiada zbiornik o pojemności ok. 50 t węgla, co wystarcza na załadowanie od 3 do 5 komór zależnie od ich wielkości, oraz drąg do wypychania gotowego koksu.

Po wprowadzeniu węgla i szczelnym zamknięciu komór zaczyna się proces koksowania, który w zależności od konstrukcji pieca i gatunku węgla trwa od 11 do 30 godz, po czym następuje usuwanie gotowego koksu z komory koksowniczej za pomocą odpowiednio zakończonego stalowego drąga wypychającego koks przez otwarte drzwi komory. Drąg wypychający jest osadzony albo na wsadnicy, jeżeli ładowanie węgla do komór odbywa się przy jej pomocy, albo na specjalnej maszynie, zwanej wypycharką, jeżeli wprowadzanie węgla do komór odbywa się za pomocą zasypnicy. Wypycharka, podobnie jak wsadnica, porusza się na szynach prostopadle do osi komór koksowniczych.

Koks wypychany z komory spada po drugiej stronie pieca poprzez pomost przelotowy na wóz gaśniczy. Zarówno pomost przelotowy, jak i wóz gaśniczy można przesuwac po szynach, podobnie jak wsadnicę i wypycharkę, wzdłuż całego pieca po drugiej jego stronie i ustawiać na osi dowolnej komory. Rozżarzony koks jest przewożony na wozie gaśniczym do wieży gaśniczej, gdzie za pomocą natrysku strumieni wody odbywa się jego gaszenie i chłodzenie.

W starszych, mniej zmechanizowanych koksowniach, które obecnie wychodzą z użycia, gotowy koks jest wypychany z komór na tzw. zrzutnię koksową, gdzie gasi się go ręcznie strumieniem wody doprowadzanej za pomocą odpowiednich węży elastycznych.

Lotne produkty koksovania — gaz, smołę i wodę amoniakalną — rozdziela się w odbieralniku. Surowy gaz koksowniczy kieruje się do dalszego chłodzenia i oczyszczania. Część gazu (ok. 50%) oczyszczonego z amoniaku, benzolu i ewentualnie siarkowodoru zużywa się do ogrzewania pieców koksowniczych, a resztę sprzedaje się odbiorcom jako paliwo gazowe o dużej wartości opałowej (od 4500 do 6000 kcal/m³). W wielu przypadkach opłaca się sprzedawać odbiorcom całą ilość otrzymanego gazu, a piece koksownicze ogrzewać gazami o mniejszej wartości opałowej, jak np. gazem wielkopieczowym lub generatorowym.

Przedstawiony na rys. X-3 piec koksowniczy systemu H. Koppersa jest prototypem innych nowoczesnych pieców koksowniczych. Konstrukcja jego ulega ciągłej ewolucji, dostosowywana jest do nowych zdobyczy nauki i techniki. W kanałach grzewczych otaczających komory koksownicze tego pieca urządzono oszczędne i równomierne rozdzielanie paliwa gazowego, przy czym na zmianę jedna strona komory styka się z płomieniem, a druga — z gorącymi gazami. W piecu systemu H. Koppersa zostały osiągnięte dobre wyniki w zakresie zmniejszenia zużycia ciepła, co spowodowało szerokie jego zastosowanie na całym świecie. Odgazowanie jednego wsadu trwa w nowoczesnych piecach systemu H. Koppersa od 11 do 12 godz, a zużycie ciepła na należyte skoksovanie 1 kg węgla wynosi przeciętnie tylko 470—480 kcal. Obecnie przy konstruowaniu pieców koksowniczych systemu H. Koppersa zwraca się uwagę na zwiększenie ich zdolności przetwórczej przy zachowaniu dużej sprawności cieplnej. Wybudowane w ostatnich czasach piece o ładunku do 30 ton węgla pracują zadowalająco.

3. Piece mufłowe

Piece mufłowe są stosowane w różnych gałęziach przemysłu, a między innymi w przemyśle ceramicznym, chemicznym, metalurgicznym i metalowym. Dawniej piece mufłowe były obsługiwane ręcznie, obecnie obsługa ich częściowo, a w niektórych konstrukcjach prawie całkowicie została zmechanizowana.

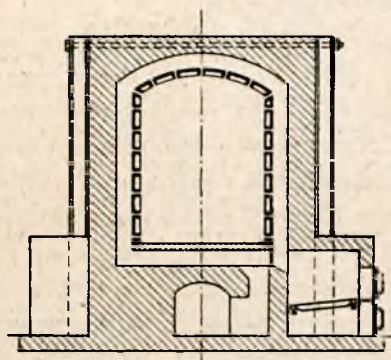
W przemyśle ceramicznym w piecach mufłowych wypala się artystyczne wyroby porcelanowe lub ładnie malowane porcelanowe i fajansowe przedmioty dla gospodarstwa domowego (np. serwisy stołowe).

Najprostszy piec mufłowy do wypalania wyrobów ceramicznych jest przedstawiony na rys. X-5. Paleniska w tego rodzaju piecach znajdują się albo z jednej strony pieca w dłuższej jego ścianie, albo w przypadku pieców większych — po obu jego stronach. Gazy spalinowe po wyjściu z paleniska opływają mufłę ze wszystkich stron i po oddaniu jej ciepła uchodzą oziębione do komina. Znajdujące się w mufli przedmioty otrzymują ciepło wskutek bezpośredniego promieniowania rozżarzonych ścian

mufl i oraz przez konwekcję za pośrednictwem powietrza i gazów wypełniających muflę.

Przy większej produkcji są stosowane do wypalania ceramiki szlachetnej piece muflowe typu tunelowego, w których wypalane przedmioty przesuwa się na wózkach wewnątrz mufl i. Jeden z takich pieców był przedstawiony na rys. VII-9 i omówiony w rozdz. VII-3.

W przemyśle nieorganicznym w piecach muflowych prowadzi się proces otrzymywania siarczanu sodowego i chlorowodoru z soli kuchennej i kwasu siarkowego. Siarczan sodowy służy do wyrobu szkła, ultramaryny, siarczku sodowego, szkła wodnego, celulozy siarczanowej i in.



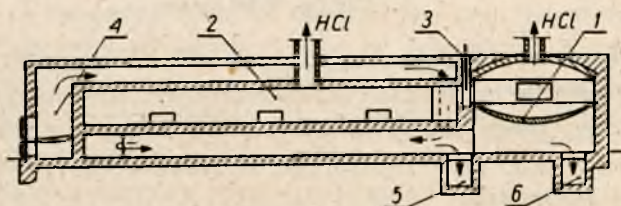
Rys. X-5. Piec muflowy

Piece muflowe do otrzymywania chlorowodoru i siarczanu sodowego są przedstawione na rys. X-6 i X-7. Reakcja otrzymywania siarczanu sodowego zachodzi w dwóch stadiach:

1. $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{NaHSO}_4 + \text{HCl}$
2. $\text{NaCl} + \text{NaHSO}_4 = \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{HCl}$

Pierwsza reakcja przebiega w stosunkowo niskiej temperaturze i prawie bez efektu cieplnego, natomiast druga jest silnie endotermiczna i wymaga temperatury ok. 800°C .

W piecu muflowym przedstawionym na rys. X-6, szeroko stosowanym do wytwarzania siarczanu sodowego i chlorowodoru w pierwszym ćwierćwieczu bieżącego wieku, a obecnie spotykanym coraz rzadziej, pierwsze



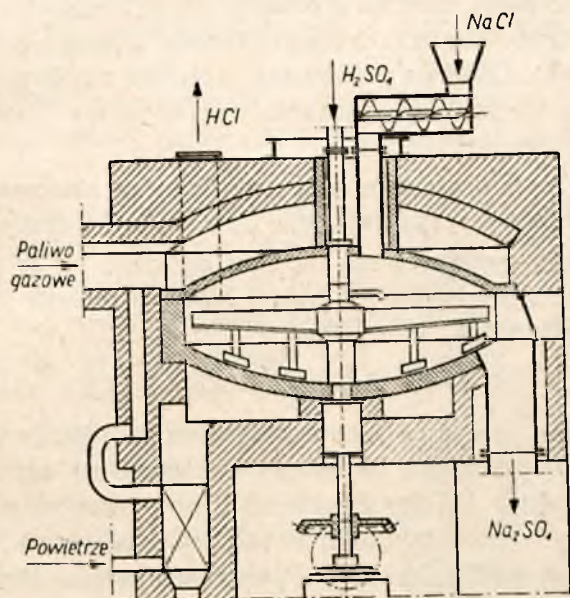
Rys. X-6. Piec muflowy do otrzymywania siarczanu sodowego i chlorowodoru:
1 — wanna, 2 — mufla, 3 — zasuw a, 4 — palenisko, 5 i 6 — kanały dymowe

stadium reakcji prowadzi się w wannie żeliwnej o średnicy od 2,5 do 3,5 m i głębokości od 0,4 do 0,7 m. Przez otwór boczny do wanny wprowadza się sól i jednocześnie rurą łożwią — kwas siarkowy o stężeniu 78% (60°Bé), po czym otwór szczelnie się zamyka. Pierwsze stadium trwa 2 godz, a wydzielający się przez ten czas chlorowódor odchodzi przez rurę szamotową w sklepieniu wykonanym z cegły kwasoodpornej. Następnie pozostałość (mieszanina NaCl , NaHSO_4 i Na_2SO_4) jest przesuwana ręcznie

po uprzednim podniesieniu zasuwy z wanny do mufl, gdzie w wyższej temperaturze przebiega drugie stadium procesu, wymagające doprowadzania ciepła.

Mufla jest wykonana z płyt szamotowych. Przepływ ogrzewających ją gazów spalinowych jest zaznaczony na rys. X-6 strzałkami. Co pewien okres czasu znajdujące się w mufl, substancje miesza się drągami stalowymi przez otwory robocze znajdujące się w jej bocznych ścianach.

Chlorowódz wydzielający się podczas reakcji chemicznej odpływa rurą szamotową. Ze względu na trujące jego działanie nie można dopuścić do wydzielania się gazów z pieca. Aby temu zapobiec, w mufl, i nad wanną



Rys. X-7. Mechaniczny piec muflowy do otrzymywania siarczanu sodowego i chlorowodoru

utrzymuje się przez pochłanianie chlorowodoru w dalszych częściach aparatury ciśnienie niższe od atmosferycznego oraz zamyka się szczelnie otwory robocze. Po zakończeniu procesu siarczan sodowy wygarnia się z mufl, do skrzynek.

Piec powyższy wytwarza do 500 kg siarczanu sodowego na dobę. Jest on obsługiwany ręcznie i pracuje w sposób okresowy. Ręczna obsługa tego pieca jest szkodliwa dla zdrowia i bardzo uciążliwa, toteż już od dość dawna zaprzestano budowy pieców tego typu. Obecnie stosuje się piece o obsłudze mechanicznej.

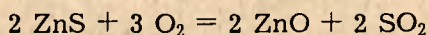
Mechaniczny piec muflowy do wytwarzania siarczanu sodowego i chlorowodoru jest przedstawiony w sposób uproszczony na rys. X-7. Sól kuchenną i kwas siarkowy doprowadza się do mufl, tego pieca od góry.

Wydzielający się chlorowódor odprowadzany jest do dalszej przeróbki rurą szamotową. Mieszanie związków reagujących ze sobą odbywa się za pomocą mieszadła grabkowego, przy czym grabie nie tylko mieszają, ale również powoli przesuwają substancje znajdujące się w muflie od środka w kierunku obwodu, gdzie w dnie muflie znajduje się otwór, przez który odchodzi produkt (Na_2SO_4).

Piece mechaniczne pracują w sposób ciągły, toteż wydajność ich jest większa od wydajności pieców ręcznych. Mechaniczny piec muflowy omówionej konstrukcji, o średnicy muflie 4,25 m, wytwarza do 15 t siarczanu sodowego na dobę. Pierwotnie wanny pieców mechanicznych wykonywano z odlewu żeliwnego, obecnie sporządza się je z szamotu ze względu na to, że wanny żeliwne zbyt szybko się zużywają. Szamotem zabezpiecza się również mieszadła. Ostatnio próbowano stosować muflę wykonane z karborundu; są one droższe, ale znacznie wytrzymalsze i bardziej szczelne. Próby te dały dobre wyniki.

W przemyśle metalurgicznym piece muflowe są stosowane do prażenia siarczków (np. blendy cynkowej) oraz do redukcji i destylacji cynku.

Prażenie blendy cynkowej ma na celu ogrzanie jej w atmosferze powietrza do temp. 900—1000°C, w której łatwo przebiega reakcja utleniania blendy wg równania

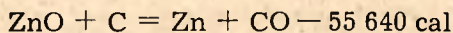


Chociaż reakcja powyższa jest egzotermiczna, jednak ilość powstającego w czasie jej przebiegu ciepła nie wystarcza na ogrzewanie do potrzebnej temperatury blendy cynkowej i powietrza, a silnie rozgrzane produkty reakcji: tlenek cynku i dwutlenek siarki oraz nadmiar tlenu i azot, opuszczając muflę zabierają z pieca dużo ciepła. Dlatego do utrzymania wystarczającej szybkości reakcji należy doprowadzać ciepło z zewnątrz.

Do wypalania blendy cynkowej dawniej stosowano piece muflowe o obsłudze ręcznej lub mechanicznej. Z ręcznych pieców muflowych najdłużej utrzymał się w małych cynkowniach piec muflowy systemu Rhenania, z mechanicznych zaś — piec muflowy systemu Spirletta, stosowany przed drugą wojną światową w naszym przemyśle na Śląsku. Konstrukcja i działanie tych pieców są podane w pracy J. Zawadzkiego pt. „Technologia chemiczna nieorganiczna”. PWT. Warszawa 1951. Obecnie wypalanie blendy odbywa się w piecach obrotowych (rys. IX-9), w piecach piętrowych (rys. XI-1), w piecach do wypalania w zawieszaniu (rys. XI-2 i XI-3) i w piecach fluidyzacyjnych (rys. XI-6).

Tlenek cynkowy otrzymany przy prażeniu blendy poddaje się w specjalnych piecach muflowych redukcji węglem w celu uzyskania technicznie czystego metalu.

Proces redukcji tlenku cynkowego przebiega wg sumarycznego równania



i wymaga ogrzewania do temperatury co najmniej 1100°C , czyli znacznie wyższej od temperatury wrzenia cynku, która wynosi 907°C . Wskutek tego otrzymuje się metal w stanie pary, którą należy oziębic w celu skroplenia, a następnie ciekły cynk wylać do formy.

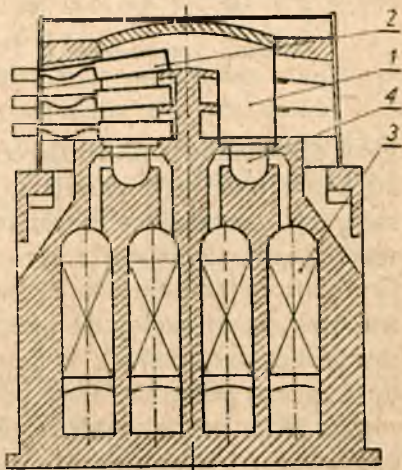
Para cynku łatwo i szybko utlenia się do ZnO pod działaniem tlenu powietrza, jak również dwutlenku węgla i pary wodnej. Należy ją wskutek tego zabezpieczyć przed gazami utleniającymi. Z tego powodu proces redukcji i destylacji cynku prowadzi się w odpowiednich piecach muflowych.

Piec mufłowy do otrzymywania cynku, stosowany w naszych cynkowniach, jest przedstawiony na rys. X-8. Posiada on dwie długie komory 1 szerokości od 1,5 do 1,7 m, w których znajdują się mufle poziome w ilości od 100 do 240 sztuk zależnie od wielkości pieca. Mufle te są umieszczone w trzech rzędach jedne nad drugimi. Tylny koniec mufli wspiera się na odpowiednim występie środkowej ściany pieca, a przedni — na ścianie frontowej. Obsługa pieca jest ręczna, co ogranicza wysokość pieca. Dla ułatwienia obsługi mufle ustawia się pochyło, przy czym kąt nachylenia górnych mufli jest większy od kąta nachylenia dolnych.

Piec jest ogrzewany gazem generatorowym i ma regenerację ciepła. Regeneratory 3 do ogrzewania paliwa gazowego i powietrza znajdują się pod piecem. Palniki 4 ze wstępną komorą spalań są umieszczone w jego trzonie. Spalanie odbywa się na zmianę raz w lewej komorze pieca, wtedy prawa para regeneratorów jest w okresie ogrzewania, a lewa — studzenia, następnie po przestawieniu odpowiednich zaworów kierunek ognia w piecu się zmienia.

W krajach bogatych w paliwo ciekłe niektóre cynkownie zamiast gazu generatorowego stosują mazut, wtedy konstrukcja pieca jest prostsza, ponieważ w tym przypadku są potrzebne tylko regeneratory powietrzne.

Mufla, w której zachodzi proces redukcji ZnO, jest przedstawiona schematycznie na rys. X-9. Jest to naczynie ceramiczne o długości od

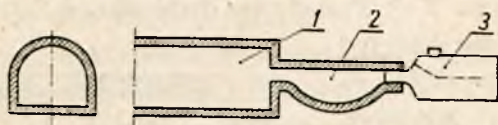


Rys. X-8. Piec mufłowy do destylacji cynku: 1 — komory, 2 — mufle, 3 — regeneratory, 4 — palniki

1,2 do 1,5 m i składa się z trzech części: właściwej muflki 1, odbieralnika 2 i blaszanego przedłużacza 3 (dymnika lub alonzu). Przekrój poprzeczny muflki ma kształt przedstawiony na rysunku, chociaż istnieją muflki o przekroju okrągłym lub eliptycznym.

Muflki wykonuje się z gliny ogniotrwałej z dodatkiem szamotu jako środka schudzającego i koksu. Odbieralniki sporządza się z takiej samej gliny z dodatkiem oprócz koksu starych rozdrobnionych odbieralników. Dodatek pokruszonych, zużytych odbieralników ma na celu zmniejszenie strat cynku, który łatwo wsiąka w ściany muflki. Przedłużacze są wykonywane z blachy stalowej. Dobrze pracująca muflka może wytrzymać ok. 30 szarż.

Po załadowaniu muflki i osiągnięciu wewnątrz niej odpowiednio wysokiej temperatury zachodzi redukcja tlenku cynkowego. Wydzielające się



Rys. X-9. Mufla do destylacji cynku

gazy dostają się z muflki do odbieralnika, w którym następuje skroplenie się par cynku, gdyż panuje w nim temperatura ok. 500°C . Nieskrapalające się gazy, zawierające stosunkowo niewielkie ilości cynku w stanie gazowym (pary), uchodzą do dymnika (wystającego z pieca, rys. X-8), w którym panuje temperatura niższa od temperatury topnienia cynku ($419,4^{\circ}\text{C}$), wskutek czego następuje przejście par cynku od razu w stan stały z pominięciem fazy ciekłej. W ten sposób otrzymuje się pył cynkowy trudny do dalszego przerobu. Ilość powstającego pyłu cynkowego wynosi co najmniej 3%, a w niekorzystnych warunkach dochodzi nawet do 10%. Gazy pozbawione cynku uchodzą z dymnika na zewnątrz.

Proces redukcji tlenku cynku w omawianym piecu trwa ok. 24 godz i jest połączony z dość dużymi stratami spowodowanymi niepełną kondensacją par cynku w odbieralniku i dymniku, ulatnianiem się cynku przez nieszczelności muflki, przenikaniem jego do ścian muflki i szczególnie dużymi stratami w pozostałych w niej tlenkach cynku (w żużlach).

Ze względu na to, że muflki pracują w sposób okresowy, obsługa pieca jest bardzo utrudniona, a zużycie paliwa dość duże, wynoszące ok. 2 kg węgla na 1 kg cynku. Starano się opracować proces redukcji cynku metodą ciągłą, co udało się osiągnąć przez firmę New Jersey Zinc Co. w piecach z pionowymi muflkami karborundowymi przy zastosowaniu brykiotowania ładunku w celu ułatwienia przepływu gazów. W Polsce powyższa metoda z powodzeniem jest stosowana od kilku lat na Śląsku w jednym z zakładów przemysłowych.

4. Piece mufłowe oraz piece z atmosferą ochronną do ciepłej i termochemicznej obróbki przedmiotów stalowych

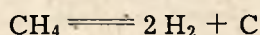
Obróbka termochemiczna wyrobów stalowych ma na celu albo utwardzenie powierzchni przedmiotów stalowych przez ich nawęglanie, azotowanie i cynkowanie, albo zwiększenie odporności tych przedmiotów na korozję przez aluminiowanie, chromowanie itd.

Nawęglanie jest to proces dyfuzyjny polegający na wzbogacaniu w węgiel powierzchni przedmiotu stalowego, wykonanego zazwyczaj z miękkiej stali. Polega ono na wielogodzinnym ogrzewaniu w temp. 850—950°C w ośrodku wydzielającym tlenek węgla, który rozkłada się wydzielając węgiel „in statu nascendi”. Węgiel ten zostaje przez powierzchnię przedmiotu adsorbowany i następnie dyfunduje w głąb metalu.

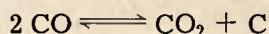
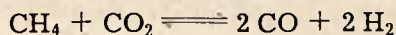
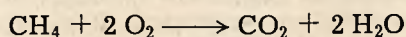
Procesem analogicznym do nawęglania jest azotowanie przebiegające w temperaturze ok. 550°C i polegające na powierzchniowym nasyceniu stali azotem. Cyjanowanie jest to proces, podczas którego powierzchnia przedmiotów stalowych nasycza się jednocześnie węglem i azotem.

Nawęglanie przeprowadza się przez ogrzewanie przedmiotów stalowych zanurzonych w proszku składającym się głównie z węgla drzewnego albo przez ogrzewanie ich w ośrodku gazowym, najczęściej w gazie ziemnym, świetlnym, koksowym itp. Obecnie nawęglanie gazowe dzięki wielu zaletom wypiera coraz więcej nawęglanie w proszkach.

Główny składnik gazów nawęglających — metan ulega w temperaturze nawęglania rozkładowi z wydzieleniem węgla



W obecności powietrza (tlenu) są możliwe reakcje



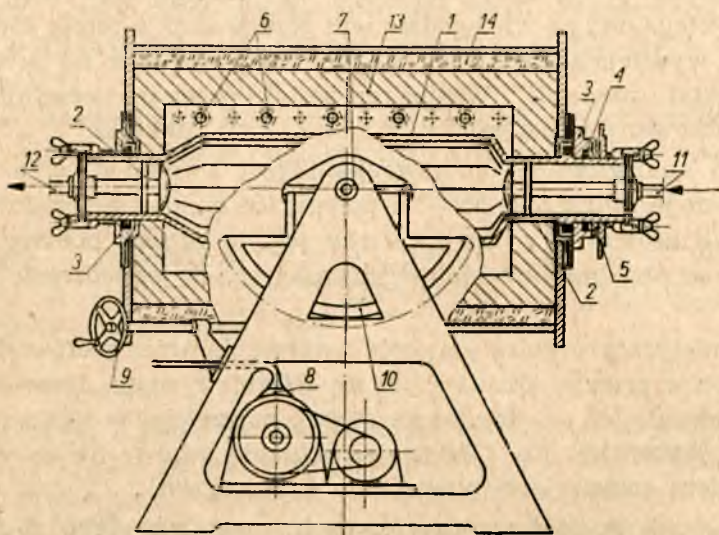
W podobny sposób rozkładają się i inne węglowodory.

Użycie do nawęglania gazów w stanie „surowym”, tj. o takim składzie, jaki normalnie posiadają, z powodu nadmiaru węglowodorów powoduje osadzanie się na nawęglanych przedmiotach i ścianach pieca sadzy, która utrudnia proces nawęglania. Aby usunąć szkodliwie działającą sadzę, wywołuje się ruch gazów nawęglających względem nawęglanych przedmiotów przez zastosowanie odpowiednich wentylatorów lub ruch przedmiotów w atmosferze gazowej, jak np. w piecach z muflą obrotową (rys. X-12).

Aby zmniejszyć wydzielanie się sadzy, gazy nawęglające poddaje się „obróbce” polegającej na częściowym spalaniu, oczyszczaniu i mieszaniu

spalin z gazem surowym lub na mieszanii gazu bogatego w węglowodory z powietrzem.

Piece do nawęglania gazowego powinny być szczelne. Nieszczelność pieca w przypadku, gdy panuje w nim nadciśnienie, powoduje przedostawanie się gazów nawęglających z pieca do otoczenia, co jest niedopuszczalne ze względu na ich własności trujące, ponieważ zawierają one CO. Natomiast w przypadku gdy wewnątrz pieca utrzymuje się podciśnienie, do jego wnętrza przez nieszczelności zasysa się powietrze z oto-



Rys. X-10. Muflowy piec obrotowy do nawęglania gazowego: 1 — retorta, 2 — pokrywy, 3 — łożyska rolkowe, 4 — łożyska oporowe, 5 — koła łańcuchowe do napędu mufli, 6 — palniki, 7 — doprowadzenie mieszanki gazu i powietrza do palników przez czop wydrążony, 8 — silnik elektryczny, 9 — kółko ręczne mechanizmu do przechylania mufli, 10 — segment ślimacznicy mechanizmu do przechylania mufli, 11 — doprowadzanie gazu, 12 — odprowadzanie gazu, 13 — obmurowanie, 14 — izolacja

czenia. Zmienia to skład gazów w piecu, co wpływa ujemnie na proces nawęglania.

Piece muflowe. Najprostszym piecem do nawęglania gazowego jest piec z obracającą się mufłą, przedstawiony na rys. X-10. Mufla 1 tego pieca, zwana również retortą, jest wykonywana z wysokoprocentowych stopów żaroodpornych w postaci graniastosłupa o 12 ścianach. Ogrzewanie odbywa się za pomocą palników gazowych 6. Gaz nawęglający jest doprowadzany rurą 11 umieszczoną na osi mufli. Odprowadza się go rurą 12 umieszczoną w przeciwnym końcu mufli. Aby uniknąć zatrucia powietrza w pomieszczeniu, w którym znajduje się piec, wylatujące rurą 12 gazy zwykle się zapala.

Ze względu na ciągły ruch i ocieranie się przedmiotów nawęglanych, osadzanie się sadzy na ich powierzchni nie jest bardzo szkodliwe i dlatego

w piecu tym można prowadzić nawęglanie gazami surowymi bez podawania ich uprzedniej obróbce, co znacznie upraszcza instalację i obniża koszty procesu.

Piece muflowe do nawęglania gazowego omawianej konstrukcji buduje się o różnych wielkościach. Średnica mufl tych pieców waha się w granicach od 200 do 500 mm, długość — od 500 do 2000 mm, a jedno-razowy wsad, zależnie od wielkości pieca i rodzaju nawęglanych przedmiotów, wynosi od 20 do 200 kg. Szybkość nawęglania jest w nich na ogół większa niż w piecach innych typów. Nadają się one do nawęglania tylko przedmiotów drobnych o kształcie zwartym i odpornym na odkształcenia, ponieważ w temperaturze ok. 920°C, w jakiej zwykle prowadzi się proces, wytrzymałość stali wynosi zaledwie 400 kG/cm².

Wadą pieca przedstawionego na rys. X-10 jest praca okresowa dopuszczalna przy stosunkowo niewielkim przerobie. W przypadku dużego przerobu stosuje się piece muflowe o działaniu ciągłym. Jeden z takich pieców jest przedstawiony na rys. X-11.

Jest to piec muflowy typu tunelowego ogrzewany paliwem gazowym (gazem ziemnym). Mufla 1 tego pieca składa się z kilkunastu spawanych części, o wymiarach poprzecznych 820 mm × 500 mm, połączonych ze sobą śrubami. Jest ona wykonana ze stopu Ni-Cr-Fe o zawartości od 35 do 40% Ni i od 17 do 20% Cr. Na dnie mufl są prowadnice (szyny), po których przesuwa się panwie (wózki) z przedmiotami do nawęglania. Piec jest dwutorowy i w muflę mieszczą się 24 panwie o pojemności od 50 do 120 kg, tak że w piecu jednocześnie mieści się od 1200 do 2880 kg wsadu. Na początku muflę znajduje się komora załadownicza 4, z tyłu zaś — komora wyładownicza 5. Obie komory są oddzielone od przestrzeni roboczej muflę zasuwami klinowymi 6. Celem tych komór jest ograniczenie dopływu powietrza do muflę w czasie ładowania i wyładowywania pieca. Poza tym w komorze wyładowniczej 5 zachodzi obniżenie temperatury przedmiotów nawęglanych do wysokości potrzebnej do dalszej ich obróbki przez hartowanie, które zazwyczaj odbywa się bezpośrednio po nawęglaniu.

Paliwo gazowe spala się pod muflę wypływając z palników 2 umieszczonych naprzemianlegle po obu stronach pieca. Ażeby ułatwić wydłużanie i kurczenie się muflę przy zmianach temperatury, spoczywa ona na rolkach 3. Panwie są przesuwane przez piec podobnie jak wózki w piecu tunelowym w jednakowych odstępach czasu, który w tym piecu wynosi od 20 do 30 min. Do przesuwania służy popychacz 7.

Gaz nawęglający jest doprowadzany do muflę omawianego pieca w czterech miejscach przez otwory 8 w sklepieniu pieca, w ilości od 4,5 do 6 m³/godz. Jeden z otworów doprowadzających znajduje się w komorze wyładowniczej i ma na celu zmniejszenie dopływu do muflę powietrza zewnętrznego podczas wyładunku pieca.

Wydajność tunelowego pieca muflowego do nawęglania gazowego, przedstawionego na rys. X-13, zależy od głębokości nawęglania i intensywności ogrzewania. Przy ogrzewaniu gazem ziemnym i nawęglaniu do głębokości 0,8 mm — 1,1 mm wynosi ona średnio od 200 do 250 kg/godz.

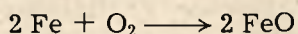
Wadami omawianego pieca o działaniu ciągłym są: duży koszt mufl, która musi być wykonana z drogich stopów, trudność wykonania dobrego uszczelnienia pieca, ponieważ miejsca uszczelniane są poddane działaniu wysokich temperatur, oraz częste i kosztowne remonty.

Piece z atmosferą ochronną. W niektórych przypadkach na przykład podczas cieplnej (termicznej) obróbki przedmiotów metalowych w celu zabezpieczenia ich powierzchni przed utlenianiem ogrzewanie tych przedmiotów odbywa się w środowisku gazów obojętnych, czyli w atmosferze ochronnej.

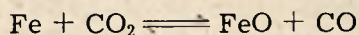
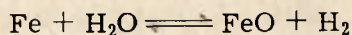
W przypadku stali widocznym dowodem utleniania są barwy nalotowe. Barwa jasnożółta, pojawiająca się w temperaturze ok. 220°C, jest wywołana powstaniem na gładkiej powierzchni stali warstwy tlenków grubości 0,045 μ. Barwy brunatna, fioletowa, niebieska i ciemnoszara, pojawiające się w temp. 400—500°C, powstają na skutek coraz głębszego utleniania. Poczynając od temp. 500—600°C utlenianie odbywa się szybciej i, gdy grubość warstwy tlenków osiągnie ok. 25 μ, mówi się już o zgorzelinie.

Intensywność utleniania stali jest tym większa, im wyższa jest temperatura. Do temperatury ok. 550°C utlenianie jest minimalne, w temperaturach zaś przekraczających 800°C utlenianie szybko wzrasta z podwyższeniem się temperatury. Oczywiście, grubość zgorzeleniny zależy również i od czasu ogrzewania.

W wysokiej temperaturze utlenia żelazo nie tylko tlen wg reakcji



ale również para wodna i dwutlenek węgla zgodnie z reakcjami:



Dwie ostatnie reakcje są odwracalne i zależą od stosunku stężeń (ciśnien cząstkowych) składników gazowych. Przy nadmiarze H₂O lub CO₂ reakcje przebiegają z lewej strony na prawą, powodując utlenianie ogrzewanych przedmiotów. Odwrotnie przy nadmiarze H₂ lub CO reakcje mają przebieg z prawej strony na lewą i następuje redukcja tlenków żelaza. Dlatego obróbkę cieplną należy prowadzić w atmosferze zawierającej mało pary wodnej i dwutlenku węgla. Szczególnie niebezpieczna jest H₂O i w pewnych warunkach jej działanie może być większe od działania O₂.

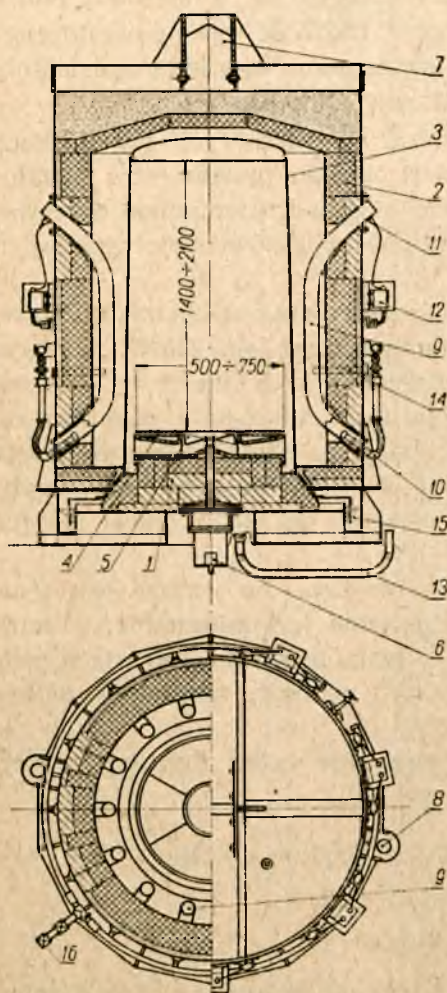
Doskonałą atmosferą ochronną przy obróbce cieplnej stali, nie reagującą z obrabianym metalem w żadnych temperaturach, mógłby tworzyć

jeden z gazów szlachetnych — hel lub argon. Ze względu na wysoką ich cenę nie są one jednak stosowane w przemyśle. Sprzedawany w butlach stalowych azot i wodór są zwykle zanieczyszczone tlenem, dwutlenkiem węgla oraz parą wodną i z tego powodu nie nadają się jako atmosfera ochronna przy obróbce cieplnej stali, a oczyszczanie tych gazów z zanieczyszczeń jest zbyt skomplikowane i kosztowne.

Z tego powodu jako atmosferę ochronną stosuje się dobrze osuszone gazy spalinowe z niepełnego lub pełnego spalania gazów: ziemnego, świetlnego lub generatorowego (z węgla drzewnego). W niektórych przypadkach gazy spalinowe przeznaczone do wytworzenia atmosfery ochronnej oprócz pary wodnej pozbawia się również dwutlenku węgla. Jako atmosferę ochronną stosuje się czasami gazy otrzymane z rozkładu amoniaku i częściowo lub całkowicie spalone oraz pozbawione H_2O .

Piece z atmosferą ochronną powinny być szczelne, aby uniemożliwić przedostawanie się gazów ochronnych, często trujących, na zewnątrz. Należy je poza tym zapatrzyć w urządzenia do odprowadzania gazów ochronnych poza budynek, przy czym, gdy są to gazy palne, należy je spalać wypuszczając z pieca (świeca gazowa). Ściany mufl i komory roboczej pieców z atmosferą ochronną należy wykonywać ze stali żaroodpornej lub z innego żaroodpornego stopu. Cegła szamotowa ma tendencję do pochłaniania i następnie — w czasie nagrzewania — do wydzielania tlenu, który „zanieczyszcza” atmosferę ochronną.

Jeden z pieców, stosowany do obróbki cieplnej (głównie do wyza-



Rys. X-12. Piec do termicznej obróbki z atmosferą ochronną: 1 — spód pieca, 2 — dzwon zewnętrzny, 3 — mufla wewnętrzna, 4 — ruszt do ładowania wsadu, 5 — wentylator, 6 — silnik wentylatora, 7 — ucho do podnoszenia, 8 — ucho prowadzące, 9 — rury żarowe, 10 — palniki, 11 — świece zapłonowe, 12 — transformatory do świec, 13, 14 — przewody termopar, 15 — uszczelnienie hydrauliczne dzwonu, 16 — doprowadzanie gazu

rzania) w atmosferze ochronnej wyrobów stalowych (kręgów taśm i drutu, pakietów blachy i innych), jest przedstawiony na rys. X-12. Jest to piec dzwonowy ogrzewany rurami żarowymi z atmosferą ochronną wewnątrz mufl. Składa się on z nieruchomego trzonu (spodu) 1, zewnętrznego dzwonu 2 i wewnętrznej, uszczelnionej od dołu mufl 3. Na spodzie pieca znajduje się ruszt 4 do załadowania wsadu. Wentylator 5 napędzany silnikiem elektrycznym 6 zapewnia potrzebną do szybszego nagrzewania wsadu cyrkulację gazu ochronnego, który wypełnia muflę 3. Dzwon zewnętrzny 1 jest zaopatrzony w ucho 7 do podnoszenia i dwa ucha prowadzące 8 potrzebne w czasie podnoszenia i opuszczania dzwonu 1. Jest on wykonany z blachy stalowej odpowiednio usztywnionej i wyłożonej wewnątrz cegłą szamotową. Między płaszczem a obmurowaniem znajduje się warstwa izolacji cieplnej.

Ogrzewanie odbywa się za pomocą rur żarowych 9 wykonanych ze stopu odpornego na działanie wysokich temperatur. W dolnej części każdej rury znajduje się palnik doprowadzający paliwo gazowe. Spalanie zachodzi wewnątrz rury żarowej 9 na całej jej długości. Zapłon uzyskuje się za pomocą świec 11, dla których prąd wysokiego napięcia wytwarzają transformatory 12. Pomiar temperatury wewnątrz i na zewnątrz dzwonu odbywa się za pomocą termopar 13 i 14. Regulacja temperatury w piecu jest automatyczna, wspólna dla wszystkich palników.

Gazy spalinowe z rur żarowych, jak widać na rysunku, uchodzą bezpośrednio do hali fabrycznej, wobec czego konieczna jest dobra jej wentylacja.

Gaz ochronny doprowadza się pod muflę 3 przez otwory w spodzie pieca. Po skończonej obróbce cieplnej dzwon zewnętrzny 1 zdejmuje się i przenosi na inny spód, załadowany wsadem i przykryty muflą, a wsad wyżarzony stygnie pod muflą, chroniony atmosferą ochronną. Jeden dzwon zewnętrzny może obsługiwać 3 lub 4 piece muflowe z atmosferą ochronną. Oczywiście, podnoszenie, przenoszenie i opuszczanie ciężkiego dzwonu odbywa się za pomocą odpowiedniej dźwignicy, w którą powinna być zaopatrzona piecownia.

PIECE DO PRAŻENIA SIARCZKÓW METALI W CIENKIEJ WARSTWIE, W ZAWIESINIE I W STANIE FLUIDALNYM

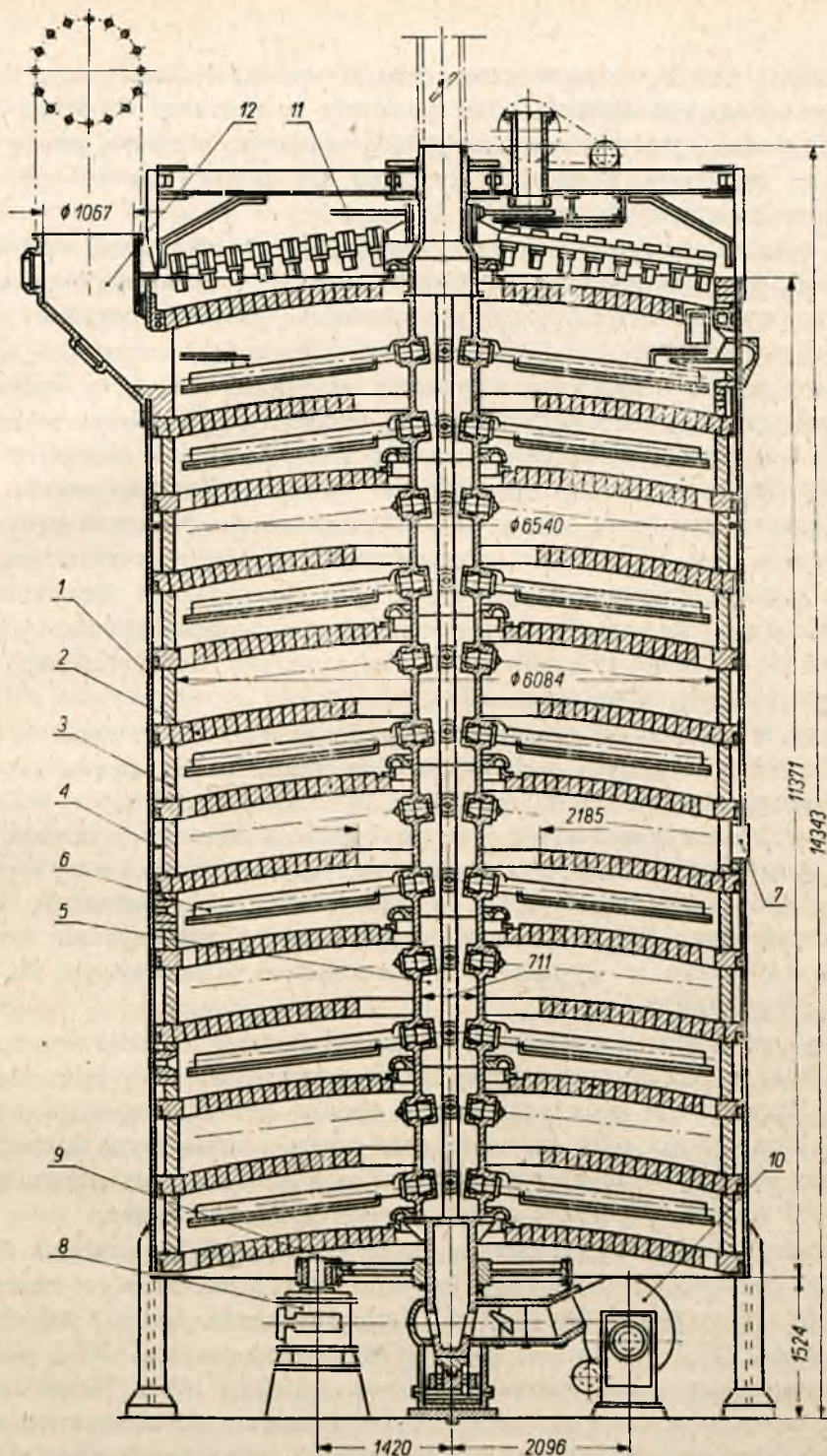
1. Piece do prażenia w cienkiej warstwie

Siarczki metali: piryt i markazyt (FeS_2), chalkopiryt (CuFeS_2), blenda cynkowa (ZnS), galena (PbS) i inne są poddawane prażeniu utleniającemu, aby uzyskać tlenek metalu i dwutlenek siarki. Do tego celu są stosowane piece do prażenia w cienkiej warstwie (np. piece obrotowe i piece piętrowe typu Hereshofa) oraz piece do prażenia w zawieszynie i piece fluidyzacyjne.

Reakcje utleniania siarczków metali zachodzą na ogół w wysokich temperaturach i są egzotermiczne, ale ilość wydzielającego się przy tym ciepła nie zawsze wystarcza na ogrzanie do potrzebnej temperatury substratów reakcji (siarczków i powietrza). Przy prażeniu siarczków ubogich w siarkę (np. blendy cynkowej) proces prowadzi się z doprowadzaniem ciepła. W przypadku prażenia siarczków bogatych w siarkę (np. pirytów) proces jest samowystarczalny i prowadzi się go w piecach piętrowych typu Hereshofa (rys. XI-1), w piecach obrotowych, omawianych w rozdziale IX, w piecach do prażenia w zawieszynie oraz w piecach fluidyzacyjnych.

Siarczki poddawane prażeniu w piecach muflowych, obrotowych i piętrowych tworzą warstwę o grubości od 30 do 300 mm zależnie od konstrukcji pieca i rodzaju siarczku. Utlenianie siarczków odbywa się na powierzchni warstwy. Jak wykazały badania doświadczalne, prędkość przesuwania się procesu utleniania w głąb warstwy, gdy jest ona nieruchoma, dla większości siarczków wynosi od 4 do 8 mm na 1 godz. Prędkość ta wzrasta z podwyższeniem temperatury i maleje, gdy warstwa jest ubita. Istotny wpływ na prędkość posuwania się procesu utleniania w głąb warstwy wywiera skład fazy gazowej nad warstwą, szczególnie zawartość tlenu, która powinna być możliwie duża.

Gdyby prażony materiał był w piecu nieruchomy, to proces jego utleniania trwałby, jak wynika z powyższego, bardzo długo. Należycie utleniona byłaby tylko cienka, powierzchniowa jego warstewka. Dlatego jednym z głównych warunków normalnego przebiegu procesu prażenia



Rys. XI-1. Piec piętrowy do prażenia siarczków: 1 — płaszcz, 2 — sklepienie, 3 — obmurowanie, 4 — izolacja, 5 — wał, 6 — ramiona, 7 — okna, 8 — silnik elektryczny, 9 — przekładnia zębata, 10 — wentylator, 11 — dozownik, 12 — króciec do odprowadzania gazów

siarczków jest bezustanne przegarnianie prażonych materiałów, mające na celu ciągle odnawianie i uaktywnianie powierzchni warstwy. Szczególnie dodatni wpływ na odnawianie powierzchni wywiera przesypywanie się materiału z górnego poziomu na dolny, jak to się dzieje w piecach piętrowych (rys. X-1).

W celu należytego rozwinięcia powierzchni siarczki przed wprowadzeniem do pieca są poddawane rozdrobnieniu, przy czym stopień rozdrobnienia powinien być taki, aby przepływające gazy nie porywały wypalanych materiałów.

Ruch gazów w piecach do prażenia w cienkiej warstwie wpływa na grubość gazowej warstewki granicznej, przylegającej do powierzchni warstwy, i na proces utleniania, a poza tym — na proces unoszenia pyłu. Szybki dopływ tlenu do wszystkich aktywnych (tj. odnowionych) części powierzchni materiału oraz szybkie odprowadzanie gazowych produktów utleniania jest warunkiem intensywnego przebiegu procesu prażenia. Ilość gazów przepływających przez piec do prażenia siarczków jest zwykle duża, ponieważ w celu przyspieszenia procesu utleniania doprowadza się do niego tyle powietrza, aby zawartość tlenu w gazach odlotowych była nie niższa niż 8—12%.

Gazy w piecach do prażenia siarczków przepływają zwykle w przeciwnym kierunku do prażonego materiału. Stosowanie przeciwnych prądów zapewnia zwiększone stężenie tlenu w strefie, w której zachodzi wykończanie procesu utleniania siarczków oraz powiększenie stężenia dwutlenku siarki w gazach odlotowych. Poza tym przeciwny prąd pozwala na wykorzystanie ciepła gazów odlotowych do podgrzewania i podsuszania świeżo doprowadzonych siarczków oraz do stopniowego podgrzewania kosztem ciepła zawartego w wyprażonych siarczkach doprowadzanego do pieca zimnego powietrza.

Prędkość przepływu gazów w piecach do prażenia siarczków w cienkiej warstwie ze względu na intensyfikację procesu powinna być możliwie duża. Ogranicza ją nadmierny wzrost oporów hydraulicznych oraz porywanie dużej ilości pyłu przy prażeniu bardziej zmielonych materiałów. Z tego powodu w niektórych przypadkach prędkość przepływu gazów w piecu wynosi tylko 2—3 m/sek, zwykle zaś jest większa.

Konstrukcja i zasady działania pieców muflowych do prażenia siarczków w cienkiej warstwie były już omówione poprzednio (w rozdz. X), obecnie rozpatrzmy piec piętrowy typu Hereshofa. Jeden z takich pieców konstrukcji radzieckiej jest przedstawiony na rys. XI-1. Jest to piec przeznaczony do prażenia siarczków miedzi i niklu. Składa się on ze stalowego płaszcza 1 obmurowanego wewnątrz cegłą szamotową, kopulastych (sferycznych) sklepień szamotowych 2 wykonanych z cegieł o odpowiednim kształcie i z mechanizmu do przegarniania prażonych materiałów.

Pomiędzy płaszczem stalowym, którego średnica w piecach piętrowych zależy od ich wydajności wynosi od 3500 do 6500 mm, a obmurowaniem 3 znajduje się warstwa izolacji cieplnej 4 o grubości od 10 do 50 mm. Grubość płaszcza nie jest duża i wynosi 10—12 mm, grubość obmurowania waha się w granicach od 150 do 250 mm. Liczba sklepień dzielących piec na piętra wynosi od 6 do 16, a odległość pomiędzy sklepieniami (wysokość piętra) — 320 do 700 mm. Wysokość całego pieca zależy od jego wielkości i waha się w granicach od 4500 do 14 500 mm.

Piec jest zaopatrzony w odpowiedni mechanizm do przegarniania i przesywania z piętra na piętro prażonych siarczków. Mechanizm ten składa się ze stalowego, chłodzonego od wewnątrz wału 5 i osadzonych na nim ramion 6 posiadających odpowiednie zęby, które wraz z ramionami tworzą jak gdyby grabie. Ilość takich grabi na każdym piętrze pieca wynosi od 2 do 4 zależnie od jego średnicy. Wymiana zębów na ramionach lub w razie potrzeby i ramion odbywa się przez odpowiednie otwory (okna), które posiada piec na każdym piętrze w ilości od 2 do 4. Otwory te, zamykane żeliwnymi drzwiczkami, służą poza tym do obserwacji pracy pieca.

Wał z osadzonymi na nim ramionami, otrzymujący napęd od silnika elektrycznego (rys. XI-1), obraca się z prędkością od 1 do 2 obr/min. Moc silnika zależy od wielkości pieca wynosi od 4,5 do 11 kW. Grabie w czasie ruchu nie tylko przegarniają prażony materiał, lecz wskutek odpowiedniego ustawienia zębów również przesuwają go od środka ku obwodowi na jednym piętrze i od obwodu pieca do środka na drugim piętrze. Ponieważ sklepienia posiadają otwory rozmieszczone na przemian na ich obwodzie i w środku, prażone siarczki przesypują się w czasie pracy pieca przez te otwory z piętra na piętro.

Zasilanie pieca surowym materiałem przeznaczonym do prażenia odbywa się w sposób ciągły. Odpowiednio rozdrobnione siarczki są doprowadzane za pomocą dozownika tarczowego na najwyższe sklepienie pieca. Jest ono ogrzewane od dołu gazami odlotowymi, wskutek czego zachodzi na nim podgrzewanie i wstępne podsuszanie surowego materiału. Grabie przegarniające na tym sklepieniu świeże siarczki, przesuwają je ku obwodowi, gdzie spadają one do pieca na najwyższe jego piętro.

Ze względów cieplnych piec piętrowy, podobnie jak wiele innych pieców do prażenia i wypalania różnych materiałów, można podzielić na trzy strefy: podgrzewania, utleniania i studzenia. Strefę podgrzewania stanowią górne piętra pieca, w których odbywa się suszenie i ogrzewanie siarczków aż do temperatury zapłonu. Procesy powyższe są endotermiczne i zachodzą kosztem ciepła gazów dopływających od dołu. Strefę chłodzenia stanowią piętra dolne, w których tlenki metali (tzw. wypalki) są chłodzone powietrzem dopływającym przez otwarte okna najniższego piętra.

Powietrze, pobierając ciepło od wypałów w strefie chłodzenia, wchodzi w strefy utleniania ogrzane do temperatury kilkuset stopni Celsjusza, co wpływa dodatnio na proces prażenia siarczków bez doprowadzania ciepła z zewnątrz. Ruch powietrza i gazów w piecu odbywa się z dołu do góry w przeciwnym kierunku do prażonego materiału, przy czym przedostają się one z dolnego piętra na górne przez te same otwory na obwodzie i w środku sklepienia, przez które przesypują się siarczki z góry na dół. Gazowe produkty prażenia po przejściu przez strefę podgrzewania siarczków, gdzie obniżają swoją temperaturę, są odprowadzane do dalszej obróbki przez odpowiedni króciec umieszczony na najwyższym piętrze pieca (rys. XI-1).

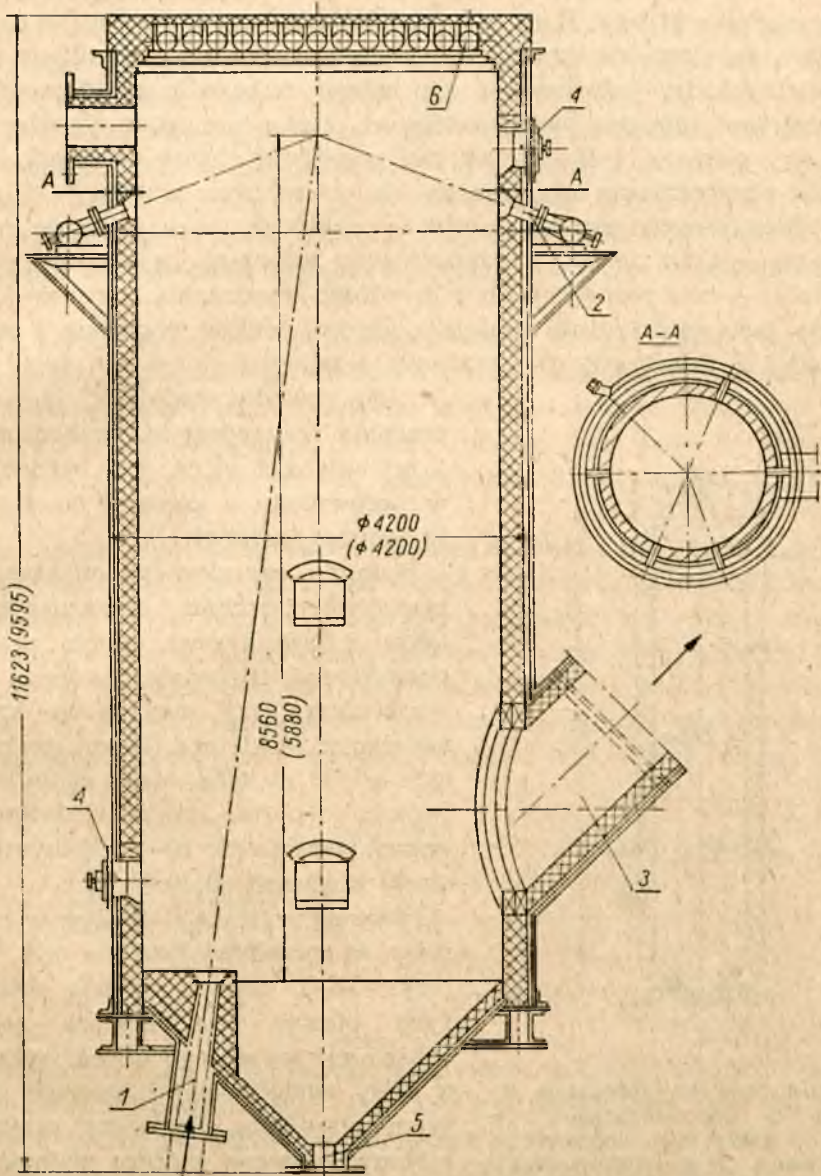
Wał, a najczęściej ramiona, są chłodzone powietrzem tłoczonym przez specjalny wentylator. Powietrze ogrzewa się przy tym do temperatury 120—200°C i może być wykorzystywane do celów użytecznych. Próby chłodzenia wału i ramion wodą nie dały zadowalających wyników.

Wspólną wadą wszystkich pieców do wypalania w cienkiej warstwie, a więc i pieców piętrowych, jest mała powierzchnia stykania się prażonych siarczków z fazą gazową. Stanowi ją bowiem górna powierzchnia warstwy, na której odbywa się proces utleniania, podczas gdy główna masa prażonych siarczków jest ukryta w głębi warstwy, dokąd nie może się dostać potrzebny tlen. Hamuje to silnie proces prażenia siarczków, ponieważ nawet przy odpowiednim przegarnianiu utleniają się one dość wolno, tak że czas przebywania ich w piecu wynosi od 3 do 6 godz. dochodząc w niektórych przypadkach nawet do 10 godz. Wady powyższej nie posiadają piece do prażenia siarczków w zawieszaniu i piece fluidyzacyjne, w których siarczki są dobrze mieszane w czasie prażenia z fazą gazową, wskutek czego powierzchnia zetknięcia się reagujących ze sobą faz jest bardzo duża, co wielokrotnie zmniejsza czas prażenia.

2. Piece do prażenia w zawieszaniu

Piece do prażenia siarczków w zawieszaniu pracują na tych samych zasadach co paleniska do spalania pyłu węglowego. Wysuszony i dostatecznie drobno zmielony materiał jest wprowadzany wraz z pierwotnym powietrzem za pomocą odpowiednich palników, które go przy tym energicznie rozpylają, do silnie rozgrzanej komory roboczej pieca. W ten sposób każda cząstka prażonych siarczków trafia od razu do przestrzeni pieca o wysokiej temperaturze wynoszącej od 600 do 1000°C, a że jest przy tym otoczona fazą gazową, zawierającą dostateczną ilość tlenu, szybko ogrzewa się do temperatury zapłonu i zapala się.

Wielka powierzchnia aktywna drobno zmielonego materiału i dostateczny nadmiar tlenu powodują bardzo intensywne utlenianie siarczków. Jak wykazały badania doświadczalne, prędkość przesuwania się reakcji utleniania drobnych cząstek (ziarek) od ich powierzchni do środka przy



Rys. XI-2. Piec do prażenia w zawieszinie z doprowadzeniem surowca od dołu: 1 — dysza (palnik) do surowca, 2 — dysze do wtórnego powietrza, 3 — króciec do odprowadzania gazów, 4 — okna, 5 — króciec do odprowadzania wypalków, 6 — rury do chłodzenia sklepienia

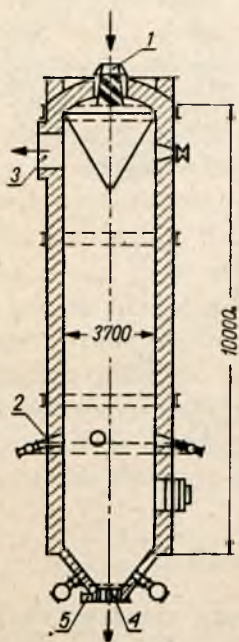
prażeniu siarczków w zawieszinie wynosi od 30 do 70 mm na 1 godz, a więc jest na ogół większa od prędkości przesuwania się procesu utleniania w głąb warstwy. Przy tym, podobnie jak przy prażeniu w cienkiej warstwie, zwiększa się ona ze wzrostem temperatury. Utlenianie w zawieszinie zachodzi jednocześnie dla całego materiału znajdującego się w przestrzeni roboczej pieca, natomiast przy prażeniu w cienkiej warstwie są utleniane tylko te ziarenka siarczków, które w danej chwili wskutek przegarniania znajdują się na powierzchni warstwy. W rezultacie oddziaływania obu czynników — szybkości posuwania się reakcji utleniania w głąb ziarenka i jednoczesności utleniania wszystkich cząstek materiału — czas potrzebny do całkowitego wyprażenia siarczków w zawieszinie jest wielokrotnie mniejszy niż w cienkiej warstwie i wynosi tylko od 2 do 6 sek, gdy czas prażenia w zawieszinie dochodzi do 10 godz.

Z tego powodu wydajność pieców do prażenia w zawieszinie, przeliczona na 1 m³ objętości pieca, jest bardzo duża w porównaniu z piecami do prażenia w cienkiej warstwie.

Wskutek energicznego mieszania się prażonych siarczków i dobrego ich kontaktu z fazą gazową proces prażenia siarczków w zawieszinie przebiega z powodzeniem przy stosunkowo małym nadmiarze powietrza (tlenu), wynoszącym od 30 do 50%. Mały nadmiar powietrza wpływa także dodatnio na wzrost stężenia (do 10—15%) dwutlenku siarki w gazach odlotowych.

Piece do prażenia siarczków w zawieszinie są przedstawione na rys. XI-2 i rys. XI-3. Główną częścią składową tych pieców jest komora robocza w kształcie wysokiego walca, wykonana z cegły ogniotrwalej i otoczona stalowym płaszczem. Pomiędzy płaszczem i obmurowaniem, którego grubość wynosi 230—250 mm, znajduje się warstwa izolacji cieplnej o grubości od 10 do 20 mm.

Do pieca, przedstawionego na rys. XI-2, wysuszone i odpowiednio zmielone siarczki są wdmuchiwane wraz z pierwotnym powietrzem przez jeden (lub więcej) palnik do pyłu, znajdujący się na dole pieca. Powietrze wtórne dopływa przez dysze w górnej jego części. Wskutek wysokiej temperatury, utrzymywanej w komorze roboczej przez rozżarzone obmu-



Rys. XI-3. Piec do prażenia w zawieszinie z doprowadzeniem surowca od góry: 1 — doprowadzenie surowca, 2 — doprowadzanie powietrza wtórnego, 3 — odprowadzanie gazów, 4 — odprowadzanie wypazków, 5 — woda chłodząca

rze, siarczki szybko się zapalają i, spadając na stożkowe dno komory, całkowicie się utleniają.

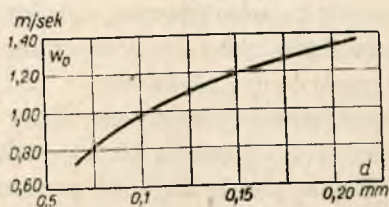
Wypałki są odprowadzane przez otwór w dnie pieca, a gazy spalinowe, zawierające głównie dwutlenek siarki, nadmiar tlenu i azot, uchodzą z pieca przez boczny króciec znajdujący się w dolnej jego części.

W ścianach bocznych pieca są włazy, przez które można się dostać do jego wnętrza w celu dokonania kontroli obmurza i usunięcia z jego powierzchni narostów. Aby utrudnić powstawanie narostów na sklepieniu pieca, chłodzi się je wodą. Oprócz włazów piec posiada również otwory zamykane drzwiczkami, służące do obserwacji procesu prażenia siarczków.

Piec przedstawiony w sposób uproszczony na rys. XI-3 różni się od poprzedniego tym, że wprowadzanie i rozpylanie siarczków odbywa się w nim od góry, a wtórne powietrze dopływa od dołu. Powietrze i gazy spalinowe przepływają przez komorę roboczą tego pieca w przeciwnym kierunku z prażonym materiałem i są odprowadzane z pieca górą, a wypałki — dołem.

Ruch prażonego materiału w komorach roboczych pieców, przedstawionych na rys. XI-2 i XI-3, jest różny. W pierwszym z nich porusza się on po torze krzywym, podnosząc się początkowo do góry, a następnie opadając na dół. W drugim piecu prażone siarczki opadają na dół po linii prostej lub spiralnej. W obu przypadkach główną częścią roboczą toru cząstek, na którym zachodzi ich utlenianie, jest jego część pionowa odpowiadająca swobodnemu spadaniu cząstek w komorze pieca. Długość

Rys. XI-4. Wykres zależności prędkości opadania siarczków od średnicy cząstek



pionowego odcinka drogi siarczków w piecu, a więc i wysokość jego komory roboczej powinna być taka, aby był zapewniony czas ich przebywania w piecu, potrzebny do należytego wyprażenia siarczków.

Oznaczając przez τ czas (w sek) potrzebny do wyprażenia drobno zmielonych siarczków, a przez w_0 — prędkość opadania ziarek prażonych siarczków w piecu, niezbędną wysokość H komory roboczej pieców do wypalania siarczków w zawieszynie można obliczyć wg wzoru

$$H = w_0 \tau \quad \text{m} \quad [\text{XI-1}]$$

Prędkość w_0 opadania drobno zmielonych cząstek stałych w ośrodku gazowym, jak wiadomo, zależy od wielu czynników, głównie zaś od wielkości cząstek i lepkości ośrodka. Jak wykazały badania eksperymentalne,

zależność prędkości opadania siarczków od średnicy ich cząstek w piecach do wypalania w zawieszinie wyraża się w postaci wykresu przedstawionego na rys. XI-4. Ponieważ czas τ potrzebny do całkowitego wyprężenia drobnych siarczków w zawieszinie, jak już poprzednio zostało wyjaśnione, wynosi od 2 do 6 sek (przy czym drobniejsze cząstki wymagają krótszego, a grubsze — dłuższego czasu), wysokość pieców do prażenia w zawieszinie jest tym większa, im siarczki są grubiej zmielone. Drobniejsze mielenie siarczków obniża wysokość pieców, ale wpływa ujemnie na zanieczyszczenie gazów odlotowych pyłem. Unoszenie siarczków z gazami odlotowymi jest przyczyną dużych strat materiałowych, dochodzących w niektórych przypadkach do 50%. Do zalet pieców do prażenia siarczków w zawieszinie poza dużą wydajnością w przeliczeniu na 1 m³ objętości komory roboczej pieca należy również zaliczyć prostą konstrukcję i związany z tym stosunkowo mały koszt budowy oraz łatwą obsługę.

3. Piece fluidyzacyjne

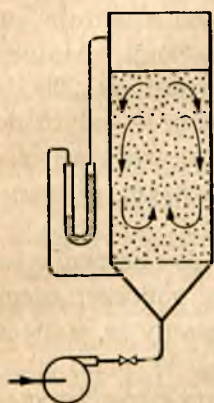
Ostatnio zaczęto stosować w przemyśle nowy proces technologiczny, zwany fluidyzacją. Proces ten jest jeszcze w początkowym stadium badań teoretycznych. Dotychczasowe jednak wyniki tych badań oraz dość duże powodzenie procesu fluidyzacji w przypadkach, gdy został on zastosowany w przemyśle, pozwalają przypuszczać, że proces powyższy w najbliższej przyszłości zdobędzie szerokie zastosowanie.

Istota procesu fluidyzacji wg J. Ciborowskiego¹⁾ polega na utworzeniu pozornej „pseudofazy”, złożonej z przepływającego do góry gazu oraz z zawieszonych i cyrkulujących w nim małych cząstek ciała stałego. Przy dużych stężeniach ziarek w tej mieszaninie i umiarkowanej prędkości przepływu gazu słup „pseudofazy” podnosi się na pewną wysokość w naczyniu, przez które przepływa. Cały układ do złudzenia przypomina wrzącą ciecz i w rzeczywistości posiada wiele własności cieczy. Obserwując proces fluidyzacji w przezroczystej kolumnie (np. w rurze szklanej), można zauważyć pęcherzyki gazu przedzierające się przez „pseudofazę” do góry. Zwiększając prędkość przepływu, można osiągnąć wykipienie zawartości aparatu. „Fazę” można również przesyłać rurociągiem i przeprowadzać szereg innych operacji właściwych cieczom.

Zasadę procesu przedstawia dość przejrzyste rysunek schematyczny aparatu laboratoryjnego (XI-5). Powietrze (lub inny gaz) ze sprężarki wchodzi do kolumny fluidyzacyjnej pod jej dno dziurkowane. Jeżeli leży na nim pewna ilość ciała sypkiego posiadającego ziarna o możliwie jednokowej wielkości, to przy małych prędkościach przepływu powietrza ładunek sypki nie wykazuje żadnych zmian. Przy stopniowym zwiększaniu prędkości przepływu wzrasta opór, jaki musi pokonywać przepływające

¹⁾ Proces fluidyzacji jest opisany na podstawie referatów i publikacji prof. dr. J. Ciborowskiego.

przez ładunek powietrze, aż do momentu, gdy jego nadciśnienie zrówna się z ciśnieniem statycznym słupa materiału sypkiego. Wtedy można zauważyć zwiększenie objętości ładunku, czyli jego ekspansję, która zwiększa się ze wzrostem prędkości przepływu powietrza, natomiast ciśnienie powietrza pozostaje stałe. Gdy gaz osiągnie w kolumnie pewną określoną prędkość przepływu, zwaną „prędkością krytyczną”, ładunek osiąga taki stan rozluźnienia, że poszczególne jego ziarna zaczynają się poruszać i przesuwają się względem siebie (rys. XI-5). Od momentu takiego upłynnienia ładunku sypkiego zaczyna się proces fluidyzacji, podczas którego słup zawieszonych w powietrzu ziarn ciała stałego sięga



Rys. XI-5. Schemat procesu fluidyzacji

w kolumnie do pewnego poziomu, a materiał sypki cyrkuluje (miesza się) w aparacie podobnie jak ciecz wrząca. Gdy prędkość przepływu gazu będzie większa od prędkości swobodnego opadania ziarn ciała stałego, wówczas będą one wywiewane z aparatu, proces fluidyzacji zakończy się i nastąpi transport pneumatyczny. Jeżeli przerwie się przepływ powietrza, faza stała opada na dno kolumny w postaci nieruchomej warstwy.

Z powyższego uproszczonego opisu procesu fluidyzacji wynika, że stwarza on bardzo korzystne warunki dla przebiegu wielu reakcji chemicznych i procesów fizycznych. Najważniejsze jego zalety są następujące:

- a) Przy przeprowadzaniu podczas fluidyzacji reakcji egzotermicznych (np. procesu prażenia siarczków) można się spodziewać wskutek dużej ruchliwości „pseudofazy” niemal idealnie równej temperatury w całym układzie fluidalnym, co jest szczególnie ważne, gdy ciało stałe jest wrażliwe na przegrzanie.
- b) Wskutek silnego mieszania współczynniki przenoszenia ciepła od ścianki aparatu do ładunku fluidalnego są wysokie. Ułatwia to doprowadzanie lub odprowadzanie ciepła poprzez ściany aparatu do reagującego w nim układu fluidalnego.
- c) Duże rozwinięcie powierzchni ciała stałego sprzyja intensywnej wymianie ciepła pomiędzy gazem i ziarnami ciała stałego, co pozwala wykorzystywać układ fluidalny do regeneracji ciepła przez ogrzewanie ciała stałego gorącymi gazami odlotowymi i powietrza (lub innych gazów) gorącymi ziarnami fazy stałej usuwanej z aparatu.
- d) Wskutek dużej stosunkowo prędkości ruchu i zderzeń ziarn warstewka graniczna, otaczająca ziarna, jest niszczona, co wpływa dodatnio na szybkość reakcji, ponieważ warstewka graniczna, jak wiadomo, stawia główny opór dyfuzji reagentów do powierzchni fazy stałej. Wzrost szybkości reakcji pociąga za sobą zwiększenie wydajności i zmniejszenie wymiarów aparatu.

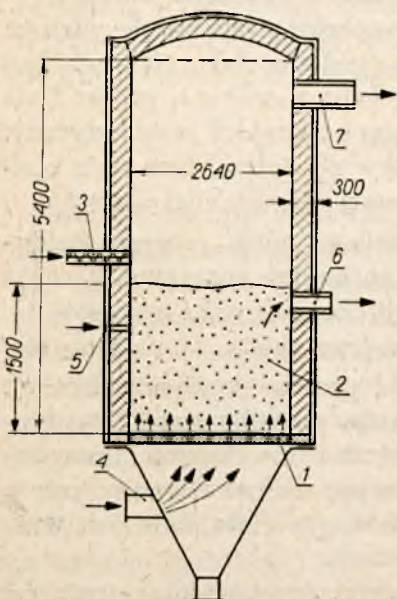
e) Duże znaczenie ma również łatwy i tani transport „fazy” fluidalnej. Można ją przesyłać rurociągami i przelewami podobnie jak ciecze, stosować zawory regulujące przepływ oraz mierzyć i kontrolować przepływ „fazy” metodami podobnymi do metod stosowanych do cieczy.

f) Najważniejszą zaletą procesu fluidyzacji jest jego prosta oraz mało skomplikowana i tania aparatura przemysłowa. Nie zawiera ona żadnych części ruchomych, grabi przegarniających i innych kosztownych urządzeń, które by wymagały częstych napraw.

Piec do prażenia siarczków w stanie fluidalnym jest przedstawiony na rys. XI-6. Posiada on cylindryczną lub prostokątną komorę roboczą obmurowaną cegłą szamotową i otoczoną płaszczem stalowym. Pomiędzy

płaszczem a obmurowaniem znajduje się warstwa materiału do izolacji cieplnej. Grubość obmurowania wynosi od 200 do 300 mm, grubość zaś izolacji — od 10 do 50 mm, przy czym grubszą warstwę izolacji stosuje się przy cieńszym obmurowaniu.

Siarczki przeznaczone do prażenia są doprowadzane do komory roboczej pieca w sposób ciągły i równomierny za pomocą odpowiedniego dozownika. Wypałki jako „faza” fluidalna wypływają przez króciec znajdujący się w bocznej ścianie pieca poniżej poziomu „pseudofazy”. Gazy odlotowe są odprowadzane przez otwór znajdujący się w sklepieniu komory roboczej pieca lub w bocznej jego ścianie (rys. XI-6).



Rys. XI-6. Piec fluidyzacyjny do prażenia siarczków: 1 — dno, 2 — siarczki w stanie fluidalnym, 3 — doprowadzanie siarczków, 4 — doprowadzanie powietrza, 5 — doprowadzenie paliwa, 6 — odprowadzenie fazy fluidalnej, 7 — odprowadzenie gazów

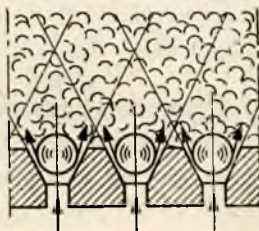
Jeżeli w piecu fluidyzacyjnym prowadzi się prażenie siarczków bogatych w siarkę, to proces przebiega bez doprowadzania ciepła, w przeciwnym przypadku należy doprowadzać paliwo w ilości tym większej, im surowce są uboższe w siarkę.

Najważniejszą częścią pieca fluidyzacyjnego jest dno jego komory roboczej, przez które doprowadza się powietrze potrzebne do wytworzenia stanu fluidalnego. Konstrukcja dna powinna ułatwiać równomierny rozdział powietrza w przekroju poprzecznym komory i uniemożliwiać przesypywanie się materiału do komory powietrznej pod dnem.

Najczęściej stosuje się dno w postaci płyty o dużej liczbie otworów cylindrycznych lub stożkowych, przedstawionej schematycznie na

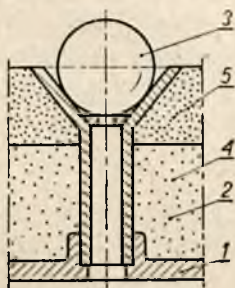
rys. XI-7. W otworach znajdują się kule, które są wykonane z materiału odpornego na działanie wysokiej temperatury. Pod działaniem ciśnienia powietrza unoszą się one do góry i przepuszczają go dołem do ładunku fluidalnego znajdującego się w piecu. W przypadku spadku ciśnienia powietrza lub przerwy w jego dopływie kule osiadają i zapobiegają przepływaniu się ładunku przez otwory pod dno aparatu. Przy takiej kon-

Rys. XI-7. Schemat wypływu powietrza przez otwory w dnie pieca fluidyzacyjnego

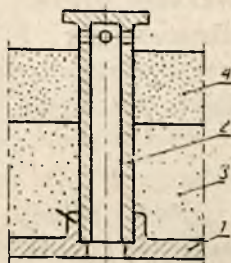


strukcji dna powietrze dopływa do komory w postaci dużej liczby strumieni, które spotykają się ze sobą i tworząc wiry, wprowadzają w stan fluidalny materiał sypki.

Konstrukcyjne rozwiązanie den pieców fluidyzacyjnych, pracujących wg powyższej zasady, przedstawiono na rys. XI-8. Nieco inna konstrukcja jest podana na rys. XI-9. Różni się ona od poprzedniej tym, że rurki nie posiadają kul, lecz są zamknięte od góry, do przepływu zaś powietrza służą otwory boczne. W obu konstrukcjach rurki są wstawione w płytę



Rys. XI-8. Szczegół konstrukcyjny dna pieca fluidyzacyjnego z zamknięciem kulowym: 1 — dno, 2 — rurka z dyszą, 3 — kula, 4 — glina zwykła, 5 — glina ogniotrwała



Rys. XI-9. Szczegół konstrukcyjny dna pieca fluidyzacyjnego z zamknięciem grzybkowym: 1 — dno, 2 — rurka, 3 — glina zwykła, 4 — glina ogniotrwała

stalową, która w celu zabezpieczenia jej przed działaniem wysokiej temperatury jest pokryta dwiema warstwami gliny; warstwa górna gliny jest ogniotrwała.

Przeprowadzono próby wykonywania den pieców fluidyzacyjnych z płyt lub rusztów żeliwnych, na które nasypywano warstwę grubszych kawałków materiału. Takie denka stawiały jednak zbyt duży opór.

Średnice wybudowanych dotychczas pieców fluidyzacyjnych do prażenia pirytu i markazytu wahają się w granicach od 2,7 do 6,1 m, wysokość zaś — od 5 do 7,4 m. Układ fluidalny w tych piecach wznosi się do wysokości ok. 1,6 m od poziomu ich den, ciśnienie zaś wdmuchiwanego powietrza wynosi 0,25—0,35 atn.

Cylindryczny piec fluidyzacyjny do prażenia koncentratów rud cynkowych posiada średnicę 6,7 m, wysokość 7,6 m, układ fluidalny wznosi się w nim do wysokości 1,9—2 m, a ciśnienie wdmuchiwanego powietrza wynosi 0,23—0,42 atn.

Prof. dr J. Ciborowski razem z mgr inż. B. Młodzińskim prowadzili badania laboratoryjne procesu prażenia pirytu i markazytu metodą fluidalną. Opierając się na powyższych badaniach, J. Ciborowski w pracy pt. „Fluidyzacja” (PWT. Warszawa 1957) podał następujące wnioski:

„Procentowa zawartość siarki w wpałkach, a więc i stopień wyzyskania siarki praktycznie nie zależą od temperatury. W przypadku gdy gazy mają być użyte do produkcji kwasu siarkowego, korzystniej jest prowadzić proces w niższych temperaturach, gdyż umożliwi uzyskanie pewnej ilości SO_3 . Jeśli chodzi o wpływ prędkości przepływu powietrza, to ponieważ stopień uzyskania siarki praktycznie od niej zależy, najkorzystniejsza jest praca przy małych prędkościach przepływu, niewiele przekraczających prędkość krytyczną. Ważny jest także dobór ziarna pirytu o odpowiedniej średnicy. W celu otrzymania odpowiednio wysokiego stopnia wyzyskania siarki stosunek powietrza do pirytu musi być ustalony na poziomie odpowiadającym stosunkom stechiometrycznym. Przy użyciu grubego ziarna trzeba stosować duże prędkości przepływu, z tego wynika duże zasilanie aparatu tym ziarnem, a więc duża intensywność procesu. Fakt, że użycie grubego ziarna jest możliwe, ma jeszcze tę korzyść, że zbędne staje się użycie bardzo drobno zmielonego surowca”.

Badania laboratoryjne procesu prażenia w stanie fluidalnym innych siarczków, głównie blendy, pozwoliły J. Ciborowskiemu na wyprowadzenie następujących wniosków: „Proces prażenia zaczyna przebiegać intensywnie dopiero powyżej temp. $800^{\circ}C$. Wyraźny wzrost stężenia SO_2 w gazach prażalnych w wyższych temperaturach oraz spadek zawartości siarki w wpałkach dowodzą, że korzystnie jest prowadzić proces w wyższych temperaturach. Należy stwierdzić, że stosując metodę fluidyzacji można prażyć nawet bardzo ubogie materiały siarczkowe. Wyzyskanie siarki wg metody fluidyzacyjnej jest lepsze niż wg innych metod stosowanych dotychczas. Zatem metoda fluidyzacji rozszerza bazę surowcową, pozwalając wykorzystać ubogie materiały, które były uważane za bezużyteczne”.

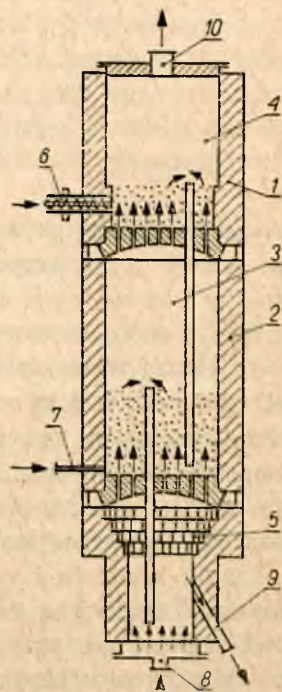
Piece fluidyzacyjne są stosowane również do wypalania wapna. Jeden z takich pieców jest przedstawiony na rys. XI-10. Posiada on trzy komory

umieszczone jedna nad drugą. Wypalanie zachodzi w komorze środkowej, górna służy do podgrzewania surowca, dolna zaś — do chłodzenia wapna palonego. Odpowiednio rozdrobniony kamień wapienny jest doprowadzany w sposób ciągły i równomierny za pomocą dozownika do komory górnej, gdzie tworząc z gazami poreakcyjnymi z komory środkowej układ fluidalny ogrzewa się kosztem ciepła zawartego w tych gazach. Następnie w stanie fluidalnym spływa on rurami przelewowymi, podobnie jak w kolumnie rektyfikacyjnej, do komory środkowej, gdzie zachodzi spalanie paliwa i właściwe wypalanie wapna. Tlenek wapniowy spływa rurą przelewową do komory chłodzenia, gdzie ogrzewa doprowadzane pod odpowiednim ciśnieniem zimne powietrze i oziębiony odpływ z pieca.

Wybudowane dotychczas piece do wypalania wapna posiadają średnicę od 1,5 do 4 m i wysokość od 7,5 do 13,5 m.

Poza wielu zaletami omówionymi wyżej wszystkie piece fluidyzacyjne posiadają również pewne wady. Największą z nich jest uniesienie przez gazy odlotowe dużej ilości pyłu. Wymaga to zainstalowania urządzeń do odpylania gazów, co znacznie zwiększa zarówno koszty instalacyjne, jak i eksploatacyjne. Drugą wadą pieców fluidyzacyjnych jest konieczność odpowiedniego rozdrobnienia i sklasyfikowania pod względem wielkości ziarn rozdrobnionych surowców, albowiem proces fluidyzacji przebiega prawidłowiej, gdy ziarna fazy stałej są mniej więcej jednakowej wielkości.

Piece do prażenia i wypalania w stanie fluidalnym stosuje się w przemyśle dopiero od niedawna, jednak biorąc pod uwagę dodatnie wyniki pracy pieców dotychczasowych konstrukcji oraz postępy badań teoretycznych nad procesem fluidyzacji, można się spodziewać, że najbliższe lata przyniosą nowe, bardziej doskonałe rozwiązania konstrukcyjne pieców fluidyzacyjnych.



Rys. XI-10. Trzykomorowy piec fluidyzacyjny do wypalania wapna: 1 — płaszcz, 2 — cegła ogniotrwała, 3 — komora wypalania, 4 — komora podgrzewania, 5 — komora chłodzenia, 6 — doprowadzanie surowca, 7 — doprowadzanie paliwa, 8 — doprowadzanie powietrza, 9 — odprowadzanie wapna, 10 — odprowadzanie gazów

KONTROLA PRACY PIECÓW

1. Kontrola przez bezpośrednią obserwację oraz za pomocą przyrządów kontrolno-pomiarowych

Ażeby piece przemysłowe mogły pracować prawidłowo przy możliwie największej wydajności i możliwie najmniejszym zużyciu paliwa, należy utrzymywać w komorze roboczej i w innych częściach pieca przez cały czas jego pracy optymalne warunki temperaturowe i ciśnieniowe, wymagane przez proces technologiczny, który zachodzi w piecu, oraz optymalny dla tego procesu skład gazów. W tym celu należy systematycznie kontrolować pracę instalacji piecowej.

Ciągła kontrola i w związku z tym regulacja pracy pieców nie tylko znacznie zmniejsza ilość braków i polepsza jakość produktów, ale również znakomicie przyczynia się do intensyfikacji ich pracy i obniżenia kosztów eksploatacyjnych. Tym się tłumaczy, dlaczego bardzo rozwinęła się w ostatnich czasach technika kontroli i regulacji pracy pieców przemysłowych.

Aby kontrola pracy pieców dała właściwe wyniki i mogła być podstawą do regulacji procesów zachodzących w instalacji piecowej, powinna ona obejmować nie tylko kontrolę instalacji jako całości, ale również kontrolę pracy poszczególnych jej części, a mianowicie palenisk, komór roboczych, rekuperatorów, regeneratorów, kotłów parowych do odzyskiwania ciepła gazów odlotowych itp.

Kontrola pracy pieców może się odbywać albo przez bezpośrednią obserwację „gołym” lub uzbrojonym w odpowiednie przyrządy okiem, albo przez obserwację wskazań przyrządów kontrolno-pomiarowych lub przy pomocy kontroli rachunkowej opartej zwykle na bilansach — materiałowym i cieplnym — instalacji piecowej.

Przez bezpośrednią obserwację koloru rozżarzonej, wewnętrznej powierzchni obmurza pieca, płomienia i produktów spalania można określić orientacyjnie temperaturę, charakter płomienia i stopień zakończenia reakcji spalania.

Płomień powstający wskutek spalania paliw zawierających węglowodory nie jest przezroczysty, jeżeli znajdują się w nim niespalone czą-

steczki składników paliwa. Świeci on bardzo jasno wskutek tego, że zawiera rozżarzone cząsteczki węgla. Płomień przezroczysty jest oznaką zupełnego i całkowitego spalania paliwa. Przy niecałkowitym spalaniu gazy spalinowe zawierają sadzę i niespalone węglowodory, wskutek czego dym opuszczający komin ma czarny lub bury kolor. Gdy proces spalania przedłuży się poza komorę roboczą i zachodzi w kanałach dymowych prowadzących do komina, to można z tego wyciągnąć następujące wnioski, że: 1) spalanie w palenisku i w komorze roboczej nie jest całkowite i zupełne, 2) obmurze pieca jest nieuszczelne, wskutek czego zachodzi zasysanie powietrza z zewnątrz oraz 3) temperatura gazów w kanałach prowadzących do komina jest dość wysoka.

Opierając się na bezpośredniej obserwacji, można również wyciągnąć orientacyjne wnioski dotyczące ciśnienia panującego w piecu. Podnosząc do otwartych drzwiczek pieca lub do dowolnego innego otworu w jego obmurzu zapalony papier lub zapałkę, można się zorientować z kierunku płomienia, czy w piecu na wysokości otworu panuje ciśnienie mniejsze od ciśnienia atmosferycznego (ciśnienie ujemne), czy większe (ciśnienie dodatnie). W pierwszym przypadku płomień jest wciągany do pieca, w drugim zaś — odpychany od niego. Jeżeli w piecu panuje ciśnienie dodatnie, to płomień i gorące gazy wylatują przez otwarte okna na zewnątrz, gdy zaś wewnątrz pieca jest ciśnienie ujemne, powietrze zewnętrzne jest wciągane do pieca.

Kontrola pracy instalacji piecowej przez bezpośrednią obserwację zależy w dużym stopniu od osoby dokonującej kontroli (od jej doświadczenia, właściwości wzroku itp.) i ma charakter subiektywny. Metodą tą można otrzymać tylko przybliżoną charakterystykę pracy instalacji lub niektórych jej części składowych. Obiektywne wyniki kontroli oraz charakterystykę ilościową pracy instalacji piecowej jako całości i poszczególnych jej elementów uzyskuje się przez obserwację wskazań przyrządów kontrolno-pomiarowych zainstalowanych w odpowiednich miejscach pieca. Przyrządy te eliminują czynnik subiektywny. Opierając się na ich wskazaniach, można otrzymać zupełnie obiektywny obraz zjawisk zachodzących w piecu. Wskazania przyrządów kontrolno-pomiarowych umożliwiają poza tym przeprowadzanie kontroli rachunkowej pracy instalacji. Z tych powodów w dobrze prowadzonych nowoczesnych zakładach przemysłowych kontrolę pracy pieców prowadzi się obecnie za pomocą przyrządów kontrolno-pomiarowych.

Stosowanie aparatury kontrolno-pomiarowej nie eliminuje konieczności stosowania obserwacji bezpośredniej, która uzupełnia kontrolę aparaturową. Stosując jednocześnie obie metody kontroli, można szybko zauważyć zmiany w prawidłowym przebiegu procesów zachodzących w instalacji piecowej i w poszczególnych jej częściach.

Kierowanie pracą instalacji, ocena i regulacja pracy pieców oraz urządzeń pomocniczych, wykrywanie, usuwanie nieprawidłowości i usterek

w przebiegu procesów zachodzących w piecu oraz w razie potrzeby rachunek finansowy z innymi oddziałami zakładu przemysłowego opiera się w zasadzie na wskazaniach aparatury kontrolno-pomiarowej.

Kontrolę pracy wszelkiego rodzaju instalacji, a więc i pracy pieców przemysłowych można prowadzić w sposób okresowy i ciągły. Kontrola okresowa polega na tym, że pracownicy, którym jest ona powierzona, odczytują i zapisują co pewien okres czasu (np. raz w ciągu zmiany lub co kilka godzin) wskazania przyrządów kontrolno-pomiarowych, rejestrując w ten sposób najważniejsze parametry potrzebne do oceny pracy instalacji i uzyskując dane niezbędne do przeprowadzenia kontroli rachunkowej.

Kontrolę ciągłą prowadzi się za pomocą przyrządów kontrolno-pomiarowych zaopatrzonych w urządzenia rejestrujące, które na przewijającej się taśmie lub na tarczy papierowej wykreślają krzywe mierzonych wielkości. Personel obsługujący piec, śledząc przebieg tych krzywych, może tak kierować jego pracą, aby mierzone wielkości utrzymać w optymalnych granicach. Uzyskane w ten sposób wykresy umożliwiają wsteczną ocenę kierowania pracą instalacji piecowej przez obsługujących i ułatwiają wykrywanie błędów obsługi wraz z umiejscowieniem ich w przestrzeni i czasie.

Samoczynne przyrządy kontrolno-pomiarowe mogą być wyposażone również w urządzenia sygnalizacyjne. Stosuje się je w tych przypadkach, gdy osiągnięcie lub przekroczenie określonej wartości mierzonego parametru wymaga od personelu obsługującego specjalnej uwagi, gdyż wpływa ujemnie na przebieg procesu w piecu. Personel obsługujący instalację piecową, reagując na wysłany sygnał (optyczny — zapalenie się lampki kontrolnej albo akustyczny — dźwięk syreny, lub dzwonka), wykonuje czynności mające na celu utrzymanie wielkości danego parametru w optymalnych granicach.

2. Kontrola temperatury, ciśnienia i innych parametrów wpływających na pracę pieców

W dobrze prowadzonych instalacjach piecowych zwykle kontroluje się w sposób okresowy lub ciągły temperaturę, ciśnienie, skład i ilość gazów, skład, ilość i wartość opałowu paliwa, skład, ilość i temperaturę surowców oraz produktów, ilość i temperaturę powietrza oraz wody, chłodzących poszczególne części instalacji, zużycie energii do napędu wentylatorów itd.

Kontrola temperatury ma bardzo duże znaczenie dla prawidłowego kierowania pracą instalacji piecowej. Mierzenie temperatur w komorze roboczej każdego pieca ułatwia utrzymywanie w piecu w każdym czasie najodpowiedniejszych do przebiegu procesu technologicznego temperatur, co zapewnia potrzebną wydajność pieca, jakość produkcji i wytrzymałość

obmurza. Mierzac temperatury w róznych miejscach instalacji, możemy ustalic temperatury wprowadzanych do pieca surowców, paliwa, powietrza oraz odprowadzanych z pieca produktów i gazów, potrzebne do sporządzania bilansu cieplnego.

Jeżeli piec posiada urządzenia do wywoływania cyrkulacji gazów i do oddawania gorącego powietrza na zewnątrz do celów grzejnych, jak np. niektóre piece tunelowe, to kontrola temperatur pozwala na regulowanie pracy powyższych urządzeń.

W piecach kręgowych mierzenie temperatur umożliwia regulowanie procesu podgrzewania powietrza i oziębiania gazów odlotowych.

W wymiennikach ciepła, rekuperatorach i regeneratorach, w których ogrzewa się doprowadzane do pieca powietrze, paliwo gazowe i surowce, mierzy się temperatury w celu ustalenia stopnia wykorzystania w nich ciepła i sporządzania charakterystyki ich pracy. W oparciu o kontrolę temperatur gazów odlotowych, powietrza i paliwa gazowego steruje się pracą regeneratorów.

Mierzenie temperatur w kanałach pieca umożliwia jakościową ocenę strat ciepła przez promieniowanie i przewodnictwo oraz ustalenie miejsc, w których zachodzi zasysanie powietrza z zewnątrz. Pozwala to również na orientacyjną ocenę stopnia rozrzedzenia wytwarzanego przez komin.

Do mierzenia temperatur są stosowane termometry cieczowe (rtęciowe, spirytusowe i manometryczne, pirometry oporowe, termoelektryczne, optyczne i stożki Segera)¹⁾.

Kontrola ciśnienia umożliwia utrzymywanie w róznych miejscach pieca potrzebnych dla prawidłowego przebiegu procesu technologicznego ciśnień wpływających na rozkład temperatur i charakter atmosfery w piecu. Pozwala ona również na określenie wielkości oporów na poszczególnych odcinkach drogi gazów, wysokości ciśnień w róznych miejscach instalacji piecowej i ilości przepływających gazów.

Mierzenie ciśnień nie prowadzi co prawda do bezpośrednich wniosków o charakterze procesu technologicznego, który przebiega w piecu, umożliwia jednak wykrycie jego odchyień od normalnego przebiegu.

Ciśnienie w komorze roboczej pieca umożliwia ustalenie, czy zachodzi zasysanie do pieca powietrza zewnętrznego, czy na odwrót — przedostawanie się gazów z pieca do otoczenia przez nieszczelności obmurza, co wpływa na temperaturę i skład gazów w piecu. Powiększając rozrzedzenie, wskutek zasysania powietrza przez obmurze można stworzyć w piecu atmosferę utleniającą lub przestrzenie wypełnione zimnymi gazami. Powiększając zaś ciśnienie w piecu, można osiągnąć wypełnienie komory roboczej gorącymi gazami i w ten sposób podwyższyć w niej temperaturę.

¹⁾ Konstrukcja, zasady działania, zakres stosowania i inne wiadomości o termometrach i pirometrach są podane w książce — W. Riedl, B. Młodziński i M. Bober: Aparatura i przyrządy kontrolno-pomiarowe w przemyśle chemicznym. Część I: PWT. Warszawa 1958.

Kontrola ciśnień w paleniskach, rekuperatorach i regeneracjach przy wlocie i wylocie z nich powietrza oraz gazów w kanałach dymowych i w przewodach gazowych daje pojęcie o wielkości panujących tam ciśnień oraz o oporach, które muszą pokonywać przepływające przez nie gazy. Zmiana ciśnień wskazuje na zmianę oporów wskutek zanieczyszczenia się lub uszkodzenia (zawalenia się) kanałów, którymi przepływają gazy.

Mierząc ciśnienie przy podstawie komina, można otrzymać całkowite rozrzedzenie, które on wytwarza. Przez porównanie powyższego ciśnienia z ciśnieniem przed zasuwą kominową skreśla się zapas ciśnienia nie wykorzystanego w instalacji piecowej.

Pomiar ciśnień w wielu przypadkach daje możliwość ustalenia ilości przepływających gazów. Większość przyrządów stosowanych do mierzenia ilości gazów przepływających przez kanały i przewody, jak wiadomo, jest oparta na mierzeniu różnicy ciśnień.

Najczęściej stosowanymi przyrządami do mierzenia ciśnień nie przekraczających 500 mm H₂O (z takimi właśnie ciśnieniami mamy do czynienia w instalacjach piecowych) są manometry hydrostatyczne (cieczowe) w kształcie litery U oraz mikromanometry z rurką pochyłą. Stosowane są również manometry membranowe, pływakowe, dzwonowe oraz pierścieniowe (wagi pierścieniowe)¹⁾.

Kontrolę paliwa prowadzi się w celu ustalenia jego zużycia, składu chemicznego, zawartości w niektórych przypadkach szkodliwych składników (np. siarki) oraz w celu sporządzenia bilansów-materiałowego i cieplnego, a ponadto obliczenia sprawności pieca.

Skład chemiczny oraz wartość opałową paliwa określa się w laboratorium analitycznym i na podstawie uzyskanych wyników ustala się przydatność paliwa do celów technologicznych oraz cieplnych. Bada się również żużel otrzymany w piecu w celu ustalenia zawartości w nim części palnych.

W przypadku paliw gazowych oprócz ilości doprowadzanego do pieca paliwa i jego składu kontroluje się również jego temperaturę, ponieważ wpływa ona na temperaturę osiąganą w piecu.

Bardzo ważna jest kontrola składu gazów w piecu. Badanie gazów spalinowych opuszczających piec daje możliwość ustalenia ich ilości, wielkości nadmiaru powietrza, ilości powietrza zasysanego przez nieuszczelnności obmurza oraz charakteru atmosfery w piecu (utleniającej, redukującej lub obojętnej).

Ustalenie składu gazów za komorą roboczą pieca pozwala sądzić o tym, czy zachodzi zupełne i całkowite spalanie paliwa, czy zaś niezupełne (na CO) lub niecałkowite (obecność w gazach spalinowych węglowodorów).

¹⁾ Patrz odnośnik na str. 287.

Kontrola składu gazów w kanałach za komorą roboczą przy wejściu do rekuperatorów i regeneratorów oraz przy wyjściu z nich, przed i za zaworami oraz zasuwami w różnych miejscach pieca, umożliwi wykrycie zasysania powietrza zewnętrznego oraz dopalania się gazów palnych.

Potrzebne do analizy próbki gazów są pobierane okresowo z różnych miejsc pieca. W miejscach, gdzie temperatura gazów jest wysoka, stosuje się rurki porcelanowe lub metalowe chłodzone wodą. Pobrane próbki gazów poddaje się następnie analizie w laboratorium chemicznym zwykle za pomocą aparatu Orsata.

Najczęściej przy analizie produktów spalania można ograniczyć się tylko do określenia zawartości w nich CO_2 , O_2 , CO i N_2 . Wilgotność gazów spalinowych zwykle określa się metodą rachunkową lub wyjątkowo na podstawie specjalnych badań. Jeżeli produkty spalania zawierają H_2 i węglowodory, to do ich analizy są używane aparaty dostosowane do analizy składu gazów palnych (metodą spalania).

Oprócz okresowych ręcznych badań składu gazów spalinowych stosuje się obecnie coraz częściej analizatory automatyczne, mniej co prawda dokładne od analizatorów ręcznych (np. aparatu Orsata), ale kontrolujących w sposób ciągły zawartość w gazach spalinowych CO_2 i innych składników. Nowoczesne, automatyczne analizatory gazów nie tylko w sposób ciągły określają (w %) zawartość jednego (np. CO_2) lub więcej (np. CO_2 i $\text{H}_2 + \text{CO}$) składników mieszaniny, ale również rejestrują ją na wykresach w postaci krzywych. Daje to możliwość personelowi obsługującemu piec szybkiego reagowania w przypadku niekorzystnych zmian składu gazów w piecu.

Ilość paliwa gazowego i powietrza, doprowadzanych do pieca, ustala się na podstawie prędkości przepływu gazu i wielkości powierzchni przekroju poprzecznego kanałów, przez które one przepływają. Do tego celu służą rurki spiętrzające (np. rurka Pitota), przepływomierze wirnikowe (np. anemometry) i przepływomierze zwężkowe¹⁾.

Najczęściej kontroluje się ilość powietrza potrzebnego do spalania oraz zużywanego do chłodzenia i ilość paliwa gazowego. Zwykle nie mierzy się ilości gazów spalinowych, ponieważ mają one często zbyt wysoką temperaturę i przepływają przez kanały murowane, w których umieszczenie przyrządów pomiarowych jest dość trudne.

3. Ogólne wiadomości o automatycznej regulacji pieców przemysłowych

Piece przemysłowe pracujące w sposób ciągły wymagają dla prawidłowego biegu procesu technologicznego określonych warunków temperaturowych, ciśnieniowych i innych. Z różnych jednak przyczyn zarówno

¹⁾ W. Riedl i in.: Aparatura i przyrządy kontrolno-pomiarowe w przemyśle chemicznym. Część I i II. PWT. Warszawa 1958 i 1959.

temperatura i ciśnienie w piecu, jak i wartość opałowa paliwa, współczynnik nadmiaru powietrza oraz skład gazów ulegają ciągłym wahaniom. Personel obsługujący instalację piecową w celu utrzymywania powyższych parametrów na optymalnym poziomie dla procesów zachodzących w piecu musi prowadzić bez przerwy regulację pracy instalacji.

Regulację pracy pieców prowadzi się w zakładach przemysłowych ręcznie lub automatycznie. Ręczna regulacja pieców ma dość dużą wadę polegającą na tym, że personel obsługujący piec przystępuje do regulacji wtedy, gdy zauważy zmianę parametrów charakteryzujących przebieg procesów w piecu, a więc wtedy, gdy parametry powyższe zmieniły już dość znacznie swoją wielkość, co najczęściej nie jest pożądané.

Przy regulacji automatycznej w przypadku niezależnej od personelu obsługującego piec zmiany regulowanych parametrów regulator szybko sprowadza je do wielkości optymalnych. Jeżeli wielkość jednego z regulowanych parametrów została przez personel świadomie zmieniona, to regulator automatycznie zmienia również i inne parametry.

Automatyczna regulacja, jak wynika z powyższego, zapewnia stałość warunków, w których zachodzą procesy technologiczne w piecu, nie usuwając jednak konieczności ciągłego dozoru nad jego pracą. Wpływa ona dodatnio na polepszenie pracy instalacji piecowej, zwiększenie wydajności pieca i zmniejszenie zużycia paliwa, a poza tym na przedłużenie czasu pracy pieca bez remontów.

Prawidłowa praca instalacji piecowej jest uwarunkowana optymalną wielkością szeregu parametrów, z których niektóre są niezależne, jak np. ilość doprowadzanego do pieca surowca, spalanego paliwa i doprowadzanego powietrza, inne zaś zależą od parametrów niezależnych, jak np. temperatura w komorze roboczej i skład gazów w piecu. Wielkość parametrów zależnych jest uwarunkowana rodzajem i charakterem procesów zachodzących w piecu. Dlatego ustawia się zwykle regulatory kontrolujące parametry zależne i łączy się je z regulatorami kontrolującymi parametry niezależne, przy czym działanie tych ostatnich uzależnia się od działania regulatorów kontrolujących parametry zależne. W ten sposób wszelka zmiana wielkości parametru zależnego (np. temperatury w komorze roboczej) wywołuje automatycznie zmianę parametru niezależnego (np. ilości doprowadzanego paliwa).

Regulatory działają w sposób bezpośredni lub pośredni. W regulatorach o działaniu bezpośrednim zmiana wielkości regulowanego parametru wytwarza siłę wystarczającą do wykonania koniecznego działania regulującego. Regulatory działające w sposób pośredni same nie działają regulująco, lecz wprawiają w ruch urządzenia pomocnicze (serwomotory), które przestawiają odpowiednie przyrządy zmieniające parametry niezależne.

W zależności od rodzaju energii wykorzystanej do przestawiania przyrządów regulujących, regulatory o działaniu pośrednim dzielą się na regulatory hydrauliczne, pneumatyczne, elektryczne i mechaniczne. Dobrze działające regulatory niezależnie od rodzaju powinny odpowiadać następującym wymaganiom.

a) Stan równowagi regulatora powinien odpowiadać optymalnej wielkości kontrolowanego parametru.

b) Regulator powinien być dostatecznie czuły i regulować w dostatecznie wąskich granicach parametr, do regulowania którego jest przeznaczony.

c) Po osiągnięciu stanu normalnego (tj. optymalnego) regulujące działanie regulatora powinno skończyć się niezwłocznie.

d) Prędkość, z którą regulator powinien przestawiać przyrządy zmieniające parametry niezależne, musi być tym większa, im prędzej zachodzi zmiana wielkości kontrolowanego parametru zależnego.

e) Konstrukcja regulatora powinna być prosta i musi umożliwiać łatwe nastawienie wielkości regulowanego parametru.

Regulacja automatyczna pieców przemysłowych, uniezależniająca instalację piecową od personelu obsługującego, jest dużym postępem technicznym. Ułatwia ona prawidłowe kierowanie procesami zachodzącymi w piecu, zwiększa — jak było już zaznaczone — jego wydajność, zmniejsza zużycie paliwa, ilość braków i przedłuża czas pracy pieców bez remontów. Tym tłumaczy się, dlaczego nowoczesne większe instalacje piecowe zaopatruje się w regulację automatyczną.

LITERATURA

1. *Awgustinnik A. J.*: Kieramika, Gosizdstrojmat. Moskwa 1957.
2. *Berl E.*: Chemische Ingenieur-Technik, Julius Springer. Berlin 1935.
3. *Butkiewicz B. K.*: Proizwodstwo izwiesti. Moskwa 1944.
4. *Ciborowski J.*: Inżynieria chemiczna. PWT Warszawa 1955.
5. *Ciborowski J.*: Fluidyzacja. PWT, Warszawa 1957.
6. *Dawidowski R.*: Technologia ciepła i paliwa. Cz. I (skrypt). Br. Pom. Stud. Akad. Górn.-Hutn. Kraków 1948.
7. *Diomidowskij*: Pieczy cwieternej mietallurgii. Mietallurgizdat. Moskwa 1956.
8. *Euken A. u. Jacob M.*: Hochtemperaturoperationes. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1940.
9. *Galer J.*: Nowoczesne cegielnictwo. Zakł. im. Ossolińskich, Lwów-Warszawa-Kraków 1923.
10. *Ginsburg D. B.*: Pieczy i suszyla silikatnoj promyszlennosti. Gazlistromat. Moskwa 1945.
11. *Gierdziejewski K.*: Kurs odlewnictwa. Czytelnik. Warszawa 1958.
12. *Grabowski Cz.*: Zasady hydraulicznej teorii ciągu. Technika cieplna. 1929, 1930, 1931 i 1932.
13. *Grunberg R., Maréchal M.* i in.: Le zinc et ses alliages. Dunod. Paris 1946.
14. *Heiligenstaedt W.*: Obliczenia cieplne pieców przemysłowych. PWT. Katowice 1952.
15. *Henglein F. A.*: Grundriss der chemischen Technik. GmbH. Weinheim u. Berlin 1949.
16. *Hobler T.*: Ruch ciepła i wymienniki. PWT. Warszawa 1953.
17. *Kantorowicz Z. B.*: Maszyny przemysłu chemicznego. PWT. Warszawa 1959.
18. *Kosieradzki P.*: Obróbka cieplna metali. PWT. Warszawa 1955.
19. *Kwiatkowski E.*: Zarys technologii chemicznej węgla kamiennego. PWT. Warszawa 1955.
20. *Kieszyszjan T. W. i Butt L. M.*: Technologia stieklá. Gosstrojizdat. Moskwa 1949.
21. *Koepfel C.*: Feuerfeste Baustoffe. Hirzel S. Leipzig 1938.
22. *Lebiediew P. D. i Szczukin A. A.*: Promyszlennaja tieplotiechnika. Gosenergoizdat. Moskwa-Leningrad 1956.
23. *Linczewskij W. P.*: Nagriewatielnyje pieczy. Mietallurgizdat. Moskwa 1948.
24. *Mamykin P. S., Strielow K. K.*: Topki, pieczy i suszyla ognieupornych zawodow. Mietallurgizdat. Moskwa 1950.
25. *Michejew M. A.*: Zasady wymiany ciepła. PWN. Warszawa 1953.
26. *Niewiadomski St.*: Maszyny i aparaty przemysłu chemicznego. Cz. I. PWT. Warszawa 1957.
27. *Romm E. J.*: Kotielnyje agriegaty. T. II. Moskwa-Leningrad 1946.
28. *Riedl W.* i in.: Aparatura i przyrzady kontrolno-pomiarowe w przemyśle chemicznym. Cz. I. i II. PWT. Warszawa 1948.
29. *Stefanowski B.*: Termodynamika techniczna. Warszawa 1949.
30. *Szapiro E. J.*: Wytapianie szkła. PWT. Warszawa 1952.

31. *Tieriebieńkow B.P.*: Riekupieratory dla promyslennych pieczej. Gosnaucltechizdat. Moskwa 1955.
32. *Wecke-Kaminsky*: Zement. T. Steinkopf. Dresden u. Leipzig 1948.
33. *Zawadzki J.*: Technologia chemiczna nieorganiczna. PWT. Warszawa 1952.
34. *Zigałow S.F.*: Processy i aparaty swieklosacharnowo proizwodstwa. Piszczepromizdat. Moskwa 1958.
35. Kalendarz chemiczny. Cz. I. PWT. Warszawa 1954, cz. II. PWT. Warszawa 1955.
36. Maszynostrojenie T.P., Gosnaucltechizdat. Moskwa 1950.
37. Technologia chemiczna organiczna. Praca zbiorowa. T. I. PWN. Warszawa 1957.
38. Waste-Heat Recovery from Industrial Furnaces. Chapman et Hall LTD London 1948.



SERIA „INŻYNIERIA CHEMICZNA“

W ramach serii ukazały się następujące książki:

- Hobler T.: **Ruch ciepła i wymienniki.** Wyd. 2. 1959.
Johnstone E.E., Thring M.W.: **Instalacje doświadczalne, modele i metody powiększania skali.** 1960.
Krakowski J., Niewiadomski St., Żurakowski St.: **Maszynoznawstwo chemiczne.** 1960.
Leszczyński St.: **Filtracja w przemyśle chemicznym.** 1958.
Lewin R.E.: **Nowy aparat wyparny.** 1960.
Smith J.M.: **Kinetyka procesów chemii stosowanej.** 1960.
Weber H.C., Meissner H.P.: **Termodynamika dla inżynierów chemików.** 1960.
Ziółkowski Z.: **Ekstrakcja cieczy w przemyśle chemicznym.**

*

W ramach serii ukazały się następujące książki:

- Ziółkowski Z.: **Destylacja i rektyfikacja w przemyśle chemicznym.** 1960.
(w przygotowaniu dalsze tematy)

Z książek wydanych przez PWT do tej serii można zaliczyć:

- Batuner Ł.M., Pozin M.T.: **Metody matematyczne w technice chemicznej.** 1956.
Bretsznajder St.: **Zagadnienia projektowania procesów przemysłu chemicznego.** Tom I. 1956.
Ciborowski J.: **Fluidyzacja.** 1957.
Ciborowski J.: **Inżynieria chemiczna.** Wyd. 1, 1952/53, wyd. 2, 1955.
Ciborowski J.: **Problemy rachunkowe w inżynierii chemicznej.** 1954.
Cyklis D.S.: **Technika badań fizykochemicznych pod wysokimi ciśnieniami.** 1955.
Dołgow B.N.: **Kataliza w chemii organicznej.** 1953.
Filonienko G.K., Lebiediew P.D.: **Urządzenia suszarnicze.** 1956.
Hobler T.: **Ruch ciepła i wymienniki.** Wyd. 1, 1953.
Kasatkin A.G.: **Podstawowe procesy i aparaty w technologii chemicznej.** 1954.
Korndorf B.A.: **Technika wysokich ciśnień w chemii.** 1957.
Leszczyński St.: **Krystalizacja w przemyśle chemicznym.** 1956.
Majewski J., Psarski A.: **Nomogramy do obliczeń inżyniersko-chemicznych.** 1955.
Pawłow K.F., Romankow P.G., Noskow A.A.: **Przykłady i zadania z zakresu procesów i aparatów technologii chemicznej.** 1958.
Praca zbiorowa: **Kataliza i katalizatory.** 1952.
Praca zbiorowa: **Wybrane zagadnienia z inżynierii chemicznej.** 1953.
Ramm W.M.: **Procesy absorpcyjne w przemyśle chemicznym.** 1954.
Szlemiński B.: **Projektowanie typowej aparatury do procesów chemicznych.** 1956.

**PAŃSTWOWE
WYDAWNICTWA TECHNICZNE**

Warszawa, ul. Mazowiecka 2/4

polecają książki:

GORDAŁA T., KRUSZ J.:

Piece koksownicze typu Otto i ich obsługa

zł 22.—

**Technologia ogrzewania pieców kokso-chemicznych. Praca
zbiorowa**

zł 34.—

KANTOROWICZ Z. B.:

Maszyny przemysłu chemicznego

zł 95.—

NIEWIADOMSKI ST.:

Maszyny i aparaty przemysłu chemicznego. Część I. Wyd. 2

zł 12.50

**DO NABYCIA W KSIĘGARNIACH TECHNICZNYCH
„DOMU KSIĄŻKI”**

PWT Warszawa 1961. Wydanie 1. Nakład 2190 egz. Ark. wyd. 22,4. Ark.
druk. 24,60/A. Format B5. Pap. ilustr. kl. V 70X100/70 g. Rekopis oddano do
składania 16. 7. 1960 r. Podpisano do druku 13. 12. 1960 r. Druk ukończono
w grudniu 1960 r. Symbol 76153/Chn. Cena zł 44.—

Bielskie Zakłady Graficzne Bielsko-Biała, ul. Grunwaldzka 6 zam 4077/80
Wz-13

Prof. inż. Stanisław Niewiadomski — Piece w przemyśle chemicznym i przemysłach pokrewnych

Błędy dostrzeżone w druku

Str.	Wiersz	Jest	Powinno być
90	15 od góry	$(CO^p + CO^p$	$(CO_2^p + CO^p$
147	8 od góry	$= \frac{1,53 w_0^{0,5}}{a^{0,33}}$	$= \frac{1,53 w_0^{0,5}}{a^{0,33}}$
172	10 od dołu	$\left(\frac{Q}{F}\right)$	$\left(\frac{Q}{F}\right)^2$

