

Kilka uwag o piecach wapienniczych Some reflections on shaft lime kilns

1. Introduction

In world lime industry two types of kilns are used for lime burning, namely: rotary and shaft kilns (1-3). Several special kilns can also be found, for example: calcimatic, CID, multichambers and fluidal, but their share in lime production is small.

Rotary kilns are dominating in United States, South Africa. However, in Europe shaft kilns play a decisive role. The reason of this situation are the advantages of rotary kilns which have significantly greater capacity, even up to 3000 tpd and as a feed limestone of smaller granulometry can be used mostly 10 mm as well as of different properties, and they give lime of good quality. They have also much lower labour cost. These are merits of special value in USA. However, the shortcoming of rotary kilns is chiefly a great heat consumption and high investment costs (3). In order to decrease the heat consumption of rotary kilns different kind of external heat exchangers are applied: shaft (4), grate or cyclones (5). It gives the decrease of exit gas temperature and simultaneously loss of heat.

The shaft kilns are much more economical, but they reach much lower capacity and need limestone of good quality and high strength as well as of great granulometry. In general it is not possible to burn the lumps of limestone greater than 40 mm. For comparison one can remind that rotary kilns with cyclones preheater are fed with a limestone of grain size not exceeding 2,5 mm, but the share of particles smaller than 40 μ m should not be greater than 10-15% (5). The exploitation experiences with rotary kilns can be summarized, as follows (1, 4):

- long rotary kilns can burn limestone of grain size greater than 5 mm,
- long rotary kilns with shaft preheaters are fed with stone of size between 20–50 mm,
- short rotary kilns with cyclones preheater can burn limestone of granulometry smaller than 2,5 mm.

The development of production of limestone meals and sand mo-

1. Wstęp

W światowym przemyśle wapienniczym stosowane są do prażenia wapienia dwa rodzaje pieców; obrotowe i szybowe (1-3). Spotyka się również szereg pieców specjalnych, a mianowicie: calcimatic, C I D, wielokomorowe i fluidalne, jednak ich udział w wytwarzaniu wapna jest niewielki.

Piecy obrotowe przeważają w Stanach Zjednoczonych oraz w Afryce Południowej, natomiast w Europie królują piecy szybowe. Przyczyną tego stanu rzeczy są zalety pieców obrotowych, które osiągną znacznie większą wydajność, nawet 3000 t/24 h i mogą być zasilane wapieniem o mniejszym uziarnieniu, przeważnie 10 mm i o różnych właściwościach, zapewniając dobrą jakość produktu. Piecy obrotowe wykazują ponadto znacznie mniejsze koszty robocizny. Są to zalety szczególnie cenione w USA. Natomiast wadą pieców obrotowych jest przede wszystkim duże zużycie ciepła oraz duże koszty inwestycyjne (3). W celu zmniejszenia zużycia ciepła w piecach obrotowych wprowadza się różnego rodzaju zewnętrzne wymienniki ciepła: szybowe (4), rusztowe lub cyklonowe (5). Pozwala to na obniżenie temperatury gazów odlotowych, a więc zmniejszenie strat z gazami.

Natomiast piecy szybowe są znacznie ekonomiczniejsze ale osiągną dużo mniejszą wydajność i wymagają dobrej jakości wapienia o dużej wytrzymałości i o grubym uziarnieniu. Na ogół nie jest możliwe wypalanie brył kamienia mniejszych od 40 mm. Dla porównania można podać, że piecy obrotowe z cyklonowymi wymiennikami ciepła przyjmują frakcje wapienia o uziarnieniu nie przekraczającym 2,5 mm, przy czym udział cząstek mniejszych od 40 μ m nie powinien przekraczać 10-15% (5). Doświadczenia eksploatacyjne dotyczące pieców obrotowych można podsumować następująco (1,4):

- długie piecy obrotowe mogą wypalać wapień o uziarnieniu większym od 5 mm,
- długie piecy obrotowe z szybowymi wymiennikami ciepła są zasilane bryłkami o uziarnieniu 20-50 mm,
- krótkie piecy obrotowe z cyklonowymi wymiennikami ciepła

derate significantly the problem of use of limestone small fraction. Nevertheless several types of vertical kilns are known in which different technical solutions were introduced which permit the application of limestone of smaller granulometry (6-8). In the first place the double inclined klin must be mention and then the multichamber kiln and CID.

2. Heat consumption

In table 1 the examples of heat balances of some types of the most popular lime kilns are given.

Rotary kilns have much greater loss with exit gases, with radiation and convection of kiln shell. Immobile shaft kilns may have much

mogą wypalać surowiec o uziarnieniu mniejszym od 2,5 mm.

Rozwój produkcji mączek i piasków wapiennych złagodził znacznie problem wykorzystania drobnych frakcji wapienia. Niemniej jednak znanych jest wiele pieców pionowych, w których wprowadzono różne rozwiązania techniczne pozwalające na stosowanie kamienia wapiennego o mniejszym uziarnieniu (6-8). Przede wszystkim trzeba wymienić piec dwuskośny, a dalej wspomniane już piece wielokomorowe i C I D.

2. Zużycie ciepła

W tablicy 1 podano przykładowe bilanse cieplne kilku rodzajów najpopularniejszych pieców wapienniczych.

Tablica 1

ZUŻYCIE CIEPŁA KILKU RODZAJÓW PIECÓW WAPIENNICZYCH W kcal/kg CaO

Pozycje bilansu	Piece obrotowe ¹		Piece szybowe		
	długie	z cyklonowymi wymiennikami	na wsad mieszany ²	regeneracyjne	pierścieniowe ³
Przychód ciepła:					
ze spalania paliwa	1530	1350	1000	840	845
ciepło fizyczne wsadu, paliwa, powietrza	15	15	10	25	10
Rozchód ciepła:					
dekarbonizacja	715	715	715	715	715
strata z gazami ⁴	530	360	185	90	90
promieniowanie i konwekcja	250	240	80	40	40
strata z wapnem	50	50	20	20	10

Uwagi: 1) mazut, 2) koks, 3) gaz, 4) razem z odparowaniem wody, CO, straty z pyłem

Table 1

HEAT CONSUMPTION OF SOME LIME KILNS, kcal/kg CaO

Item	Rotary kilns ¹		Shaft kilns		
	long	with cyclones preheater	mixed feed ²	regenerative	ring ³
Heat income:					
from fuel consumption	1530	1350	1000	840	845
physical heat of feed, fuel and air	15	15	10	25	10
Heat expenditure:					
calcinations	715	715	715	715	715
exit gases loss ⁴	530	360	185	90	90
radiation and convection	250	240	80	40	40
lime loss	50	50	20	20	10

Remarks: 1) heavy oil, 2) coke, 3) gas, 4) with water devaporisation, CO and dust together

better heat isolation. Long residence time of material in these kilns and small gases velocities, especially in comparison with rotary kilns, cause that gases and lime living the kiln are cooled to low temperature. All these influence on low heat consumption in shaft kilns.

3. Shaft kilns with mixed feed

In the past very popular were shaft kilns with coke firing. The mixed feed is applied in these kilns which is the mixture of limestone

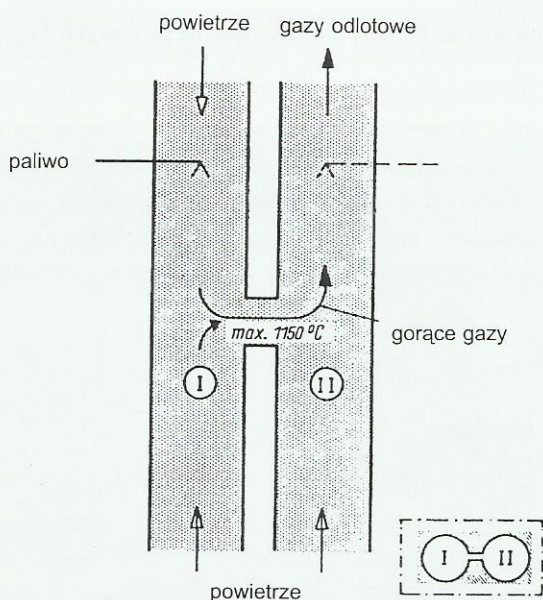
Piece obrotowe mają znacznie większe straty z gazami i straty ciepła związane z promieniowaniem i konwekcją płaszczą pieca. Nieruchome piece szybowe mogą mieć znacznie lepszą izolację cieplną. Długi czas przebywania materiału w tych piecach oraz małe szybkości gazów, zwłaszcza w porównaniu z piecami obrotowymi, powodują że gazy oraz wapno opuszczające piec są ochłodzone do niskich temperatur. Wszystko to przyczynia się do małego zużycia ciepła w piecach szybowych.

and coke. The shortcoming of shaft kilns fired with coke is that they burn a limestone in lumps greater than 50 mm. Moreover a hard limestone with high compressive strength must be used, which after calcinations will not be crushed in the kiln under a relatively high load of the material in the shaft.

Coke is a very expensive fuel. Lost of one megacalorie from coke is now about 13 grosz while is the case of heavy oil it is only 8 grosz. It is the reason of leaving of shaft kilns with coke firing and use of heavy oil or gas as a fuel. The shortcoming of shaft kilns with coke firing is a high CO content in exit gases, which are formed in a Boudoir's reaction between CO₂ in gases with red-hot coke. However in these kilns a hard burn lime with slaking time T₆₀ 10 minutes or more can be obtained relatively easily.

4. Regenerative kilns

Very popular kilns for lime burning are the regenerative kilns which are fired with heavy oil or gas (9, 10). The construction are also known which works with coal dust firing (11, 12). The principle of operation of co-current regenerative kilns is shown on fig. 1. The fuel is injected to the shaft with nozzles and a heat exchange during its combustion takes place co-currently. Hot gases leave the kiln in second shaft heating limestone counter-currently. The shaft are fired alternatively in the interval of about 15 minutes, in one the fuel is combusted and the second plays a role of recuperator of heat working counter-currently. In the construction of kilns three shafts kilns, one shaft is fired and two remaining play the role of recuperators.



Rys. 1. Schemat współprądowego pieca regeneracyjnego
Fig. 1. Co-current regenerative kiln

Regenerative kilns attain relatively high capacities and have low heat consumption. Are in exploitation two shafts kiln of capacity 600 tpd. The product is very reactive, T₆₀ is about 3–4 minutes and it is relatively difficult to produce lime of a long slake time. The

3. Piece szybowe na wsad mieszany

W przeszłości bardzo popularne były piece szybowe, opalane koksem. Są one zasilane mieszaniną wapienia i koksu, i z tego powodu nazywa się je piecami na wsad mieszany. Wadą pieców szybowych na koks jest konieczność zasilania ich surowcem o uziarnieniu większym od 50 mm. Ponadto stosować trzeba wapień o dużej wytrzymałości na ściskanie, aby po wypaleniu nie ulegał pokruszeniu w piecu pod stosunkowo dużym naciskiem, jaki wywiera wsad materiału w szybie.

Koks jest bardzo drogim paliwem. Koszt jednej megakalorii uzyskiwanej z koksu wynosi obecnie około 12 groszy, podczas gdy w przypadku mazutu jest to 5 groszy. Jest to przyczyną odchodzenia od pieców szybowych na koks i stosowania mazutu lub gazu jako paliwa. Wadą pieców szybowych na koks jest również duża zawartość CO w gazach odlotowych, której przyczyną jest reakcja Boudoirda zachodząca pomiędzy CO₂ w gazach a rozżarzoną koksem. Natomiast w piecach tych stosunkowo łatwo można uzyskać wapno silnie spieczone, o czasie gaszenia T₆₀ 10 minut i dłuższym.

4. Piece regeneracyjne

Bardzo popularnymi piecami do prażenia wapna są piece regeneracyjne, które są opalane mazutem lub gazem (9,10). Znane są także konstrukcje tych pieców przystosowane do opalania pyłem węglowym (11,12).

Zasadę działania regeneracyjnych pieców współprądowych pokazano na rysunku 1. Paliwo podawane jest do szybu dyszami, a wymiana ciepła w okresie jego spalania odbywa się współprądowo. Gorące gazy opuszczają piec drugim szybem podgrzewając w przeciwnym kierunku zalegający w nim wapień. Szyby opalane są na przemian, w odstępach około 15 minut, w jednym spalane jest paliwo, a drugi spełnia rolę rekuperatora ciepła pracującego w przeciwnym kierunku. W konstrukcjach pieców trójszybowych jeden szyp jest opalany, a dwa pozostałe służą jako rekuperatory.

Piece regeneracyjne osiągają stosunkowo duże wydajności i zużywają mało energii cieplnej. Są eksploatowane agregaty dwuszybowe o wydajności 600 ton/24 h. Produkt ma dużą reaktywność, T₆₀ około 3–4 minuty i trudno otrzymać wapno o długim czasie gaszenia. Uziarnienie wapienia zasilającego piec mieści się w granicach od 30 do 60 mm. Wapień powinien być stosunkowo czysty, pozbawiony minerałów ilastych, gdyż sublimacja potasu powoduje powstawanie napieków w przewodzie łączącym szyby co powoduje konieczność zatrzymywania pieca i ich usuwania.

5. Konstrukcje pieców szybowych opalanych paliwami ciekłymi i gazowymi

W latach sześćdziesiątych nastąpił znaczny rozwój techniki spalania różnych paliw płynnych i gazowych oraz unowocześnienie konstrukcji palników. Przykładem takiego nowoczesnego palnika,

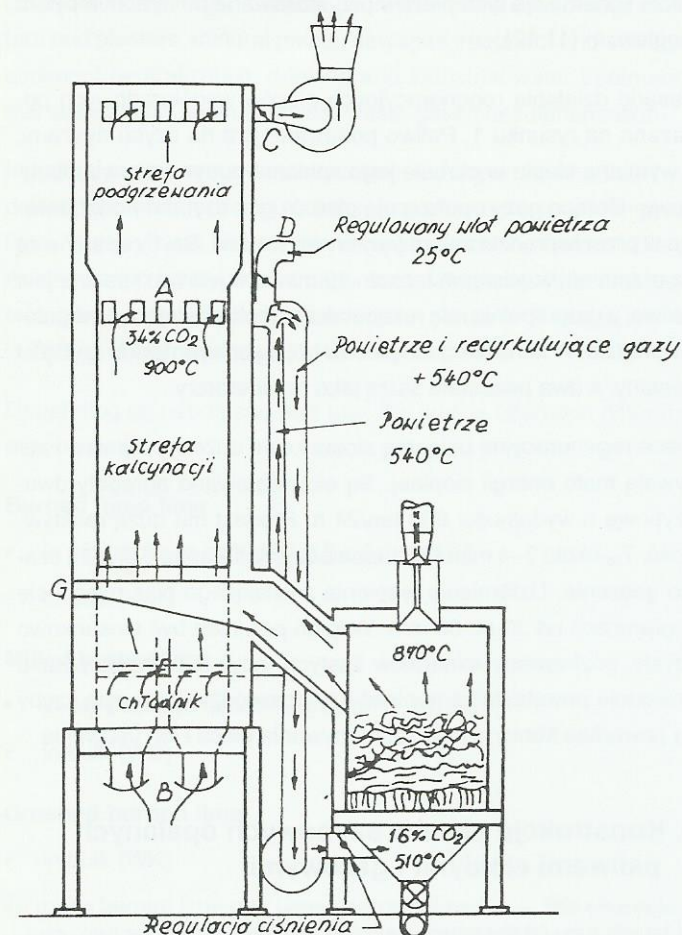
granulometry of limestone to feed the kiln is in the range 30 to 60 mm. The limestone should be relatively pure, devoid of clay minerals because the potassium sublimation gives the formation of accretion in the canal connecting the shafts which enforces the kiln stops for removing accretion.

5. Construction of shaft kilns fired with liquid and gaseous fuels

In the sixties a significant progress was achieved in combustion of different liquid and gaseous fuels and in construction of burners. The example of modern burner, elaborated especially for shaft kilns firing, is a swirl burner (13).

It must be remind that the technical solutions of shaft kilns firing with low quality coal without lime contamination with ash. There are the shaft kilns coupled with gas generator. This construction was popular in United States in fifties (14). The hearth of generator was feed with the mixture of air and exit gases from shaft kiln, after the recirculation (fig. 2). Recirculated gases from shaft kiln (A) are mixed (F) with a part of air cooling lime (E) and the air sucked in from outside (D).

From the combustion technique of fuel two kinds of shaft kilns can be distinguished:



Rys. 2. Piec szybowy zblokowany z generatorem gazu – system Azbe
Fig. 2. Shaft kiln with gas generator – system Azbe

opracowanego specjalnie z myślą o opalaniu pieców szybowych, jest palnik wirowy (13).

Trzeba przypomnieć, że znane są rozwiązania techniczne umożliwiające opalanie pieców szybowych niskogatunkowym węglem bez zanieczyszczenia popiołem wytwarzanego wapna. Są to piece szybowe sprzężone z generatorem gazu. Takie rozwiązanie było popularne w USA w latach pięćdziesiątych (14). Palenisko generatora zasilane jest mieszaniną powietrze i gazów spalinyowych z pieca szybowego, które ulegają recyrkulacji (rysunek 2). Poddane recyrkulacji gazy z pieca szybowego (A) mieszają się (F) z częścią powietrza chłodzącego wapno (E) oraz powietrza zasysanego z zewnątrz (D).

Z punktu widzenia techniki spalania paliwa można wyróżnić dwa rodzaje pieców szybowych:

- z niepełnym spalaniem paliwa w zewnętrznych komorach spalania,
- ze spalaniem paliwa w szybie pieca wapienniczego.

Jak wiadomo, spalanie paliwa w powietrzu i zachowanie nieznacznego współczynnika nadmiaru powietrza daje płomień o bardzo wysokiej temperaturze. Na przykład mazut spalany w powietrzu o temperaturze 0°C daje temperaturę płomienia przekraczającą 2000°C. Są to temperatury niekorzystne dla pieca szybowego, tak z uwagi na niszczenie wymurówki, jak i lokalne silne spieczenie wapna. Z tego względu dąży się do obniżenia temperatury płomienia i w tym celu stosuje się dwie metody:

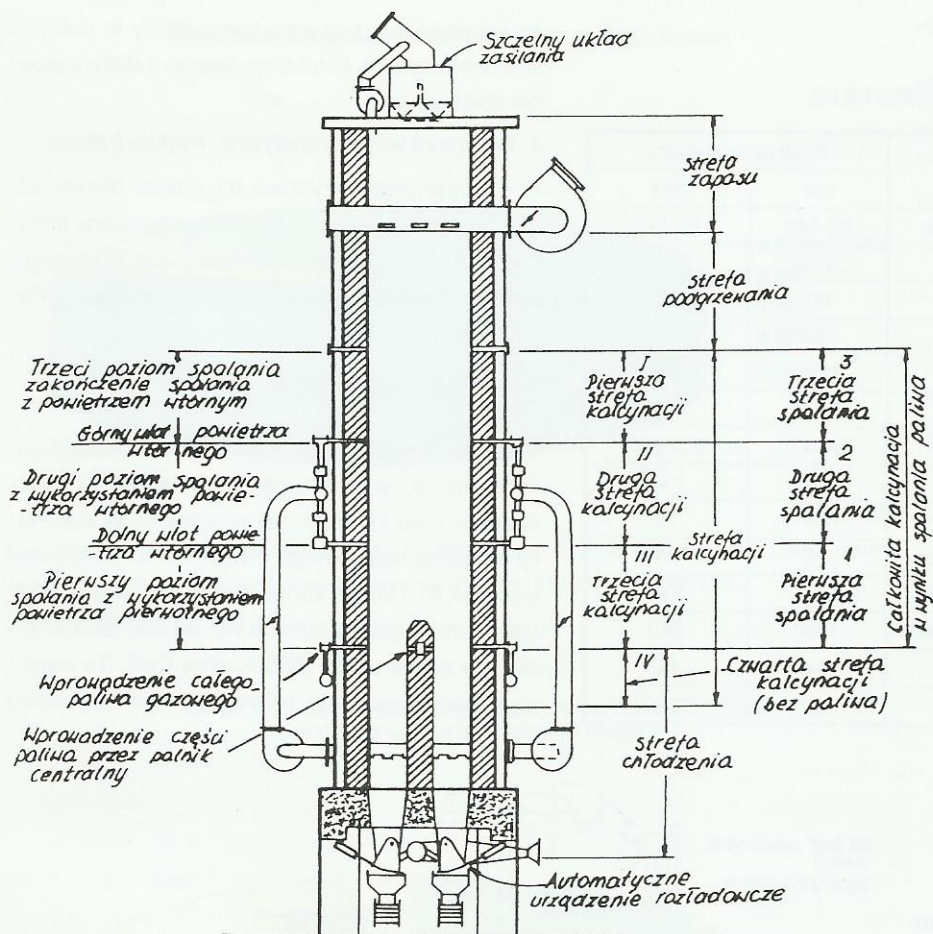
- wstępne spalanie paliwa przy współczynniku nadmiaru około 0,6,
- wprowadzanie do komory spalania gazów piecowych z recyrkulacji.

Obie te metody są wykorzystywane w praktyce. Stosowanie recyrkulacji gazów piecowych nie tylko pozwala na regulację temperatury spalania paliwa, lecz poprzez zwiększenie ilości gazów w piecu, co zwiększa ich szybkość przepływu, pociąga za sobą rozciągnięcie strefy wypalania i zmniejszenie panujących w niej temperatur.

5.1. Zasadnicze typy pieców szybowych

5.1.1. Piec szybowy prosty

Podane wcześniej metody regulacji temperatury kalcynacji w piecu szybowym opalany paliwem płynnym lub gazowym wygodnie można prześledzić na dwóch typach pieców szybowych opracowanych przez Azbego (15). Piec „Ultimos” (rysunek 3), wyposażony jest w jedno doprowadzenie paliwa, przy czym jest ono wprowadzane do szybu przez palniki boczne i w niewielkiej ilości przez palnik centralny. Piec wyposażony jest w tak zwane powietrze wtórne. Jest ono pobierane w połowie strefy chłodzenia i wdmuchiwane do pieca na dwóch poziomach. Pozwala ono na spalanie paliwa początkowo przy małym niedomiarze powietrza, a następnie przy jego nadmiarze. Daje to trzy strefy spalania i trzy fazy procesu dekarbonizacji z udziałem reakcji spalania. Czwarta



Rys. 3. Piec Ultimos

Fig. 3. Ultimos kiln

- with incomplete fuel combustion in outside chambers,
- with fuel combustion in the shaft of lime kiln.

As it is known the fuel combustion in the air with small excess coefficient gives a flame with a very high temperature. For example heavy oil combusted in air having the temperature 0°C gives the flame temperature exceeding 2000°C. There are temperatures unfavourable for shaft kiln as well as the destruction of refractory lining is regarded and hard lime sintering. For that reason it is necessary to lower the flame temperature and it is achieved by two methods:

- preliminary fuel combustion with air excess coefficient about 0.6,
- introduction to the combustion chamber of recirculated gases from the kiln.

Both methods are used in practice. Applying of kiln gases recirculation not only allows to regulate of fuel combustion temperature but also through the increase of gases in the kiln, which increase their flow velocity, the extension of burning zone is obtained with the lowering of its temperature.

faza procesu końcowego dekarbonizacji jest położona najniższej i przebiega już kosztem ciepła zgromadzonego w wapnie, bez zużycia paliwa. Rozciągnięcie strefy spalania w tym piecu zostało osiągnięte kosztem rozdzielenia powietrza na pierwotne i wtórne.

Następna konstrukcja to piec „Maximus” (rysunek 4). Jest on wyposażony w recykulację gazów piecowych oraz odciąg powietrza wtórnego. Te dwie strugi gazowe mieszają się ze sobą i są wspólnie wdmuchiwane do pieca. Pozwala to na jeszcze efektywniejszą regulację temperatury spalania i jej większe zmniejszenie. Poziom centralnego planika został podniesiony do połowy wysokości szybu.

Układy spalania: prostego (1), z recykulacją gazów piecowych (2), z powietrzem wtórnym (3), z powietrzem wtórnym i recykulacją gazów (4) pokazano na rysunku 4.

Ich wpływ na jakość wapna jest następujący:

1. Spalanie proste z centralnym palnikiem bez kontroli temperatury daje na ogół wapno o dużym stopniu spieczenia
2. Z recykulacją gazów piecowych, co pozwala na pewną kontrolę temperatury spalania. Produkuje wapno o dużym stopniu spieczenia.

Tablica 2

DANE EKSPLOATACYJNE PIECÓW DWUSKOŚNYCH

Dane techniczne	Jednostki	Wyniki eksploatacyjne	
		stary	zmodernizowany
Wydajność	t/d wapna	90-140	90-140
Uziarnienie kamienia	mm	22/56	22/56
Paliwo gaz	%	60	45
Koks	%	40	55
Temperatura górnej strefy spalania	°C	1200	990
Temperatura dolnej strefy spalania	°C	1100	1000
Temperatura gazów odlotowych	°C	200-430	240-260
Temperatura wapna	°C	<50	<50
Opór hydrauliczny pieca przy 120 t/d	mbar	50	50
Pobór energii	kWh/t wapna	25	25
Pobór energii z filtrem	kWh/t wapna	33,6	33,6
Zużycie ciepła	kcal/kg CaO	1050	940
Pozostałość CO ₂	%	3-4	1-2
Reaktywność T ₆₀	min	5	0,5-2

Table 2

DATA OF OLD AND MODERNIZED DOUBLE INCLINED KILNS

Technical data	Units	Exploitation results	
		old	new
Capacity	tpd of lime	90-140	90-140
Granulometry	mm	22/56	22/56
Fuel gas	%	60	45
Coke	%	40	55
Temp. of upper comb. zone	°C	1200	990
Temp. of low comb. zone	°C	1100	1000
Lime temp.	°C	200-430	240-260
Exit gases temp.	°C	<50	<50
Hydraulic resistance of kiln 120 tpd	Pa·10 ²	50	50
Energy consumption	kWh/t lime	25	25
Energy consumption with filter	kWh/t lime	33,6	33,6
Heat consumption	kcal/kg CaO	1050	940
CO ₂ content	%	3-4	1-2
Reactivity T ₆₀	min	5	0,5-2

5.1. Main types of shaft kilns

5.1.1. Simple shaft kiln

Given earlier methods of calcination temperature control are well seen on two types of Azbe's shaft kilns. Kiln "Ultimos" (fig. 3) has one fuel inlet which is simultaneously introduced to the shaft by side burners and in small amount by central burner. The kiln is equipped in so called secondary air. It is taken from the cooling zone and blown in the kiln on two levels. It permits to combust fuel initially with small air depletion and then with its excess. It gives three combustion zones and three phase of calcination process accompanied with combustion. The fourth phase of final calcinations is located on the lowest level and proceed at the expense of heat from lime. The extending of combustion zone was achieved through distribution of the air on primary and secondary.

Next construction is the kiln "Maximus" (fig. 4). It operates with gas recirculation and uptake of secondary air. These two gases streams mix together and are mutually blown to the kiln. It gives more effective control of combustion temperature and its greater decrease. The level of central burner is raised to the middle of shaft height.

The principles of combustion system: simple (1), with kiln's gases recirculation (2), with secondary air (3), with secondary air and kiln's gases recirculation (4) are shown in fig. 4.

Their influence on lime quality are the following:

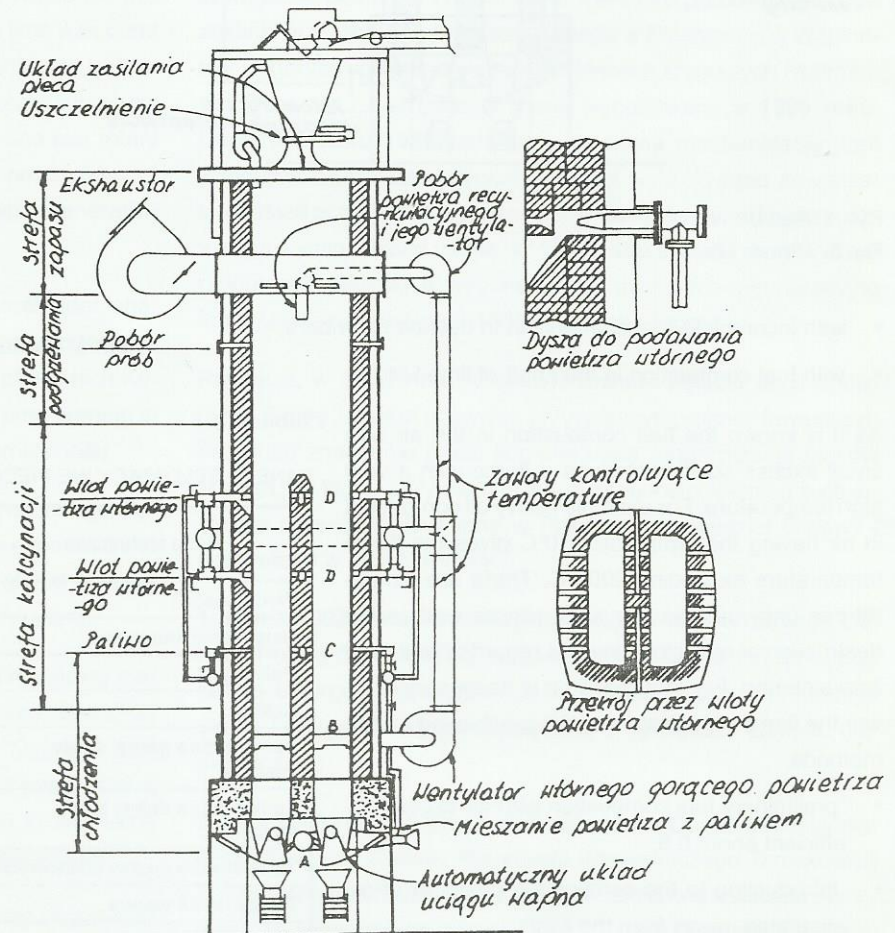
3. Zmniejszenie poziomu temperatury w dolnych strefach spalania. Produkuje wapno o dużym stopniu spieczenia.

4. Wytwarza wapno reaktywne, miękko palone.

W Europie piece szybowe na paliwa płynne lub gazowe budują między innymi następujące firmy: Maerz, Fiedler-Ofenbach, Beckenbach, West-Manchester, Eberhardt, Fercalx, Industrieanlagen Peter Zeisel GmbH i Cimprogetti.

5.1.2. Piec szybowy wielokomorowy

Piec wielokomorowy jest rozwinięciem konstrukcyjnym pieców dwuskośnych, które zostały wprowadzone w roku 1960 z przeznaczeniem do kalcynacji kamienia wapiennego o uziarnieniu 10–60 mm (rysunek 6). Dawne konstrukcje tych pieców miały temperaturę gazów odlotowych od 200 do 430°C i zużycie ciepła około 1050 kcal/kg CaO. Ta znaczna temperatura gazów odlotowych była częściowo

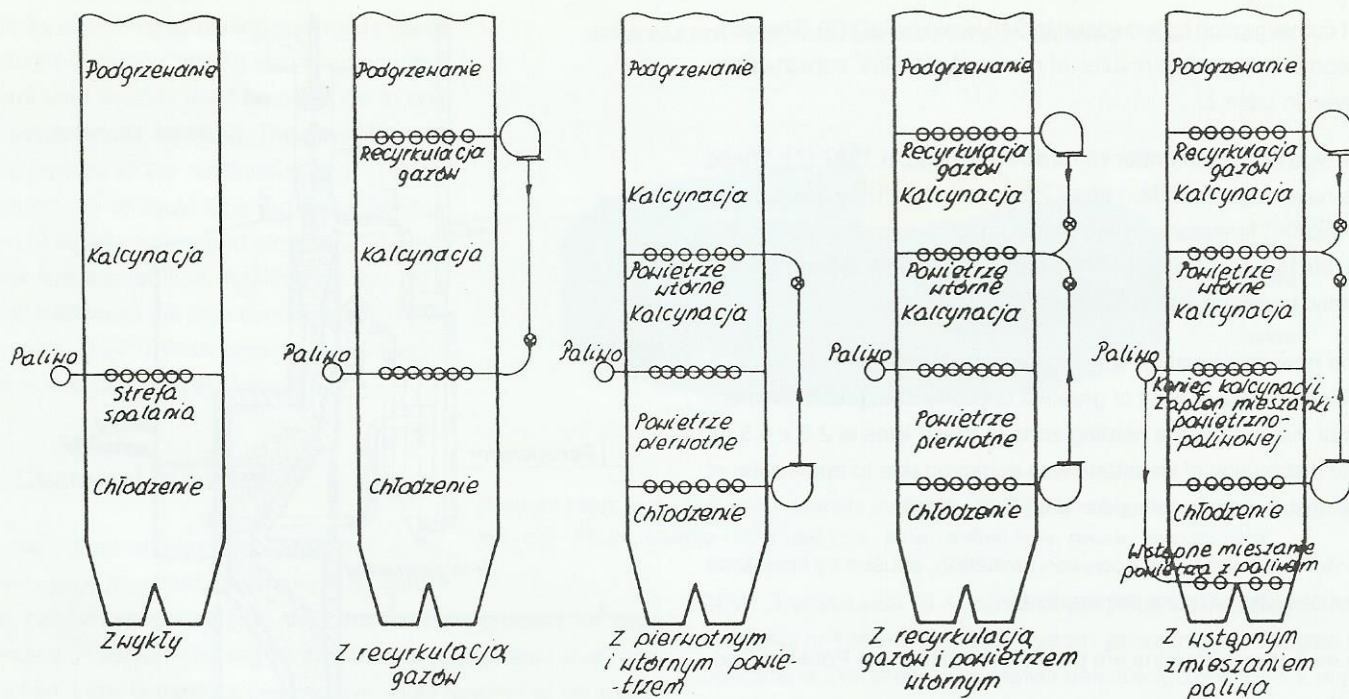


Rys. 4. Piec Maximus

Fig. 4. Kilm Maximus

wykorzystywana do podgrzewania powietrza do spalania oleju opałowego. Skośne nachylenie szybu spełniało dwa zadania:

a) tworzyło „kieszenie” umożliwiające wymieszanie paliwa z powietrzem, a następnie równomierne spalanie w przekroju po-



Rys. 5. Schematy pieców szybowych

Fig. 5. Schemes of shaft kilns

1. simple combustion with central burner without temperature control gives in general hard burn lime,
2. with recirculation of kiln's gases, which assures certain control of combustion temperature, gives hard burn lime,
3. decrease of temperature level in low zones of combustion assures production of lime of medium reactivity,
4. gives very reactive lime.

In Europe the shaft kilns fired with liquid and gas fuel are produced among others by following companies: Maerz, Fiedler, Ofenbach, West-Manchester, Eberhardt, Fercalx, Industrialeanlagen Peter Zeisel GmbH and Cimprogetti.

5.1.2. Multichamber vertical kiln

The multichamber kiln is the development of the construction of double inclined kilns, which were introduced in sixties for calcinations of limestone of granulation 10-60 mm (fig. 6). Earlier construction of these kilns had exit gases temperature from 200°C to 430°C and heat consumption about 1050 kcal/kg CaO. This high exit gases temperature was partially utilized to heat the combustion air for oil firing. The shaft inclination has two goals:

- a) creating of "pockets" for mixing of the fuel with air, then evenly combusted in cross shaft section,
- b) decreasing of hydraulic resistance for gases flow despite of smaller granulometry of limestone. It assured good distribution of combustion gases in the internal section of shaft and their penetration deep into the material in the shaft.

These kilns were significantly modernized in last years and the

przecznym szybu,

- b) zmniejszenie oporów przepływu gazów, pomimo stosowania mniejszego uziarnienia kamienia wapiennego. Gwarantowało to równomierny rozdział gazów spalinowych w wewnętrznym przekroju szybu i ich wnikanie w głąb wsadu.

Piece te zostały w ostatnich latach znacznie unowocześnione, co pozwoliło na zmniejszenie zużycia ciepła do 940 kcal/kg wapna (6). Porównanie wyników eksploatacyjnych starych i unowocześnionych pieców podano w tabelicy 2.

Nowy typ pieca wielokomorowego został wprowadzony w 1987 roku (7). Piece te osiągają wydajność od 80 do 225 t/d (rysunek 7). Są one zasilane nie płukanym kamieniem wapiennym o uziarnieniu 25/50, 60/120, 20/150 i 75/200. Mogą być opalane różnymi paliwami, a mianowicie: olejem ciężkim, gazem naturalnym, a nawet koksikiem z rafinacji ropy naftowej.

W nowych konstrukcjach wyeliminowano segregację wapienia nawet w przypadku pieców o największej wydajności 225 t/d. Wymiary szybu w strefie podgrzewania wynoszą w tych piecach 2,5 x 4,5 m. Dobry rozdział kamienia uzyskano w wyniku zabudowy statycznych rozdzielaczy w górnej części szybu. W celu zapobiegania powstawaniu napieków, pochodzących z zanieczyszczeń w kamieniu, stosuje się na szybie bomby powietrzne.

Piece szybowe wielokomorowe buduje firma Rhone-Poulenc Chemical. Zużycie ciepła wynosi około 1000 kcal/kg wapna. Pozostałość CO₂ w wapnie waha się w bardzo niskich granicach od 0,13 do 0,34% i to przy zasilaniu kamieniem o uziarnieniu 75/200, z zawartością nadziarna nawet do 250 mm. Reaktywność wapna T₆₀ mieści się w przedziale 3-4 minut.

heat consumption is decreased to 940 kcal/kg CaO (6). The comparison of exploitation results of new and old kilns' constructions is given in table 2.

New type of multichamber kiln was introduced in 1987 (7). These kilns have capacities from 80 to 225 tpd (fig. 7). They are fed with not washed limestone of the following granulometry: 25/50, 60/120, 80/150 and 100/200. They can be fired with different fuels, namely: heavy oil, natural gas and even pet coke.

In the new constructions the segregation of limestone is eliminated even in case of kilns of greatest capacity 225 tpd. The dimension of the shaft in the heating zone in these kilns is 2.5 x 4.5 m. Good distribution of limestone was achieved due to application of static distributors in the upper part of the shaft.

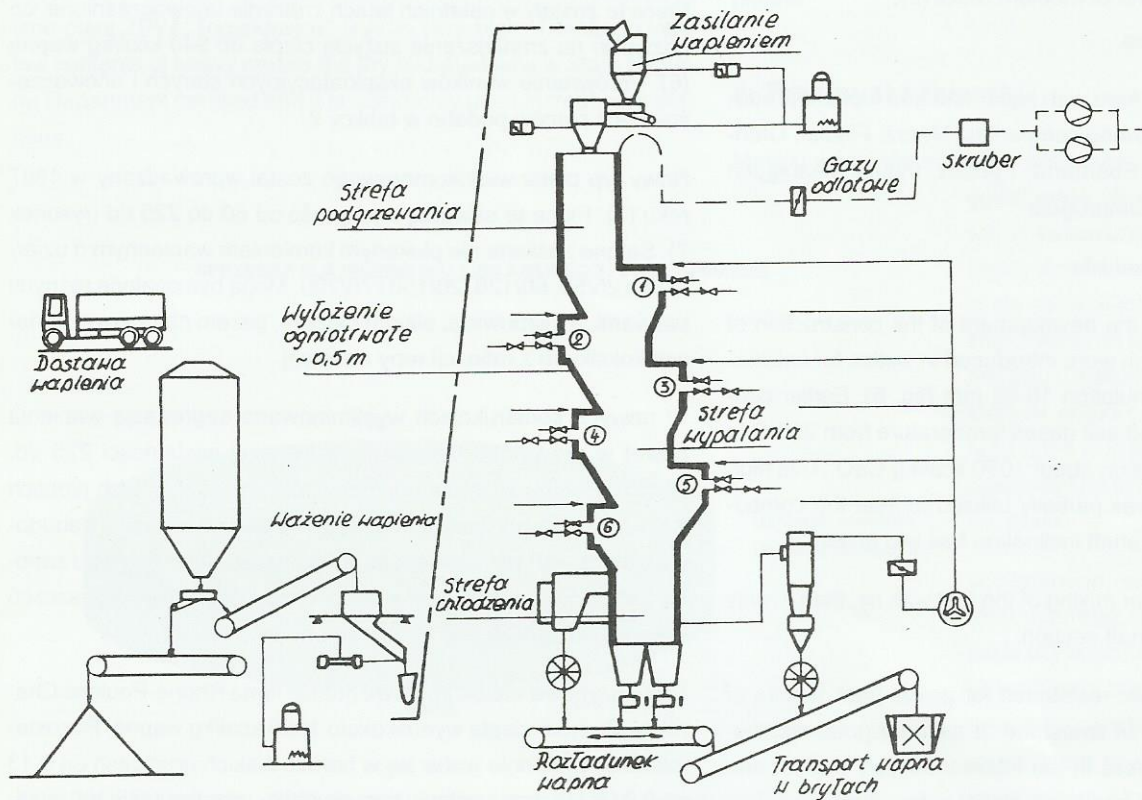
In order to eliminate the accretion formation, caused by limestone impurities, the air-guns are applied.

The multichambers kilns are produced by Rhone – Poulenc Chemical.

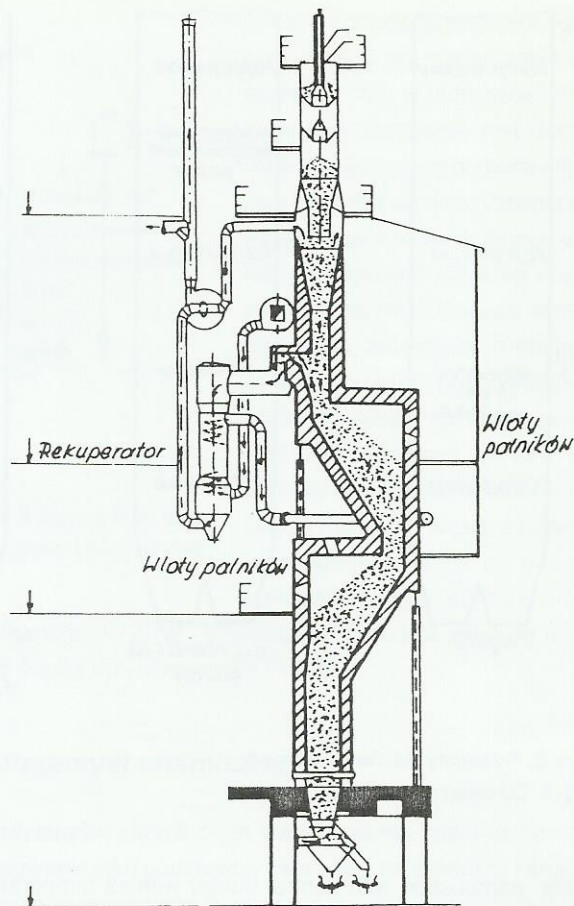
Heat consumption is around 1000 kcal/kg CaO. CO₂ content in lime fluctuates in very low limits between 0.13 to 0.34 %, even in case of limestone granulometry 75/200 and with oversize till 250 mm. Lime reactivity T₆₀ is in the range 3 – 4 minutes.

5.1.3. Shaft kiln CID

It is a very original construction with a enhanced material movement in the shaft (16). Limestone lies on the stepped platforms,



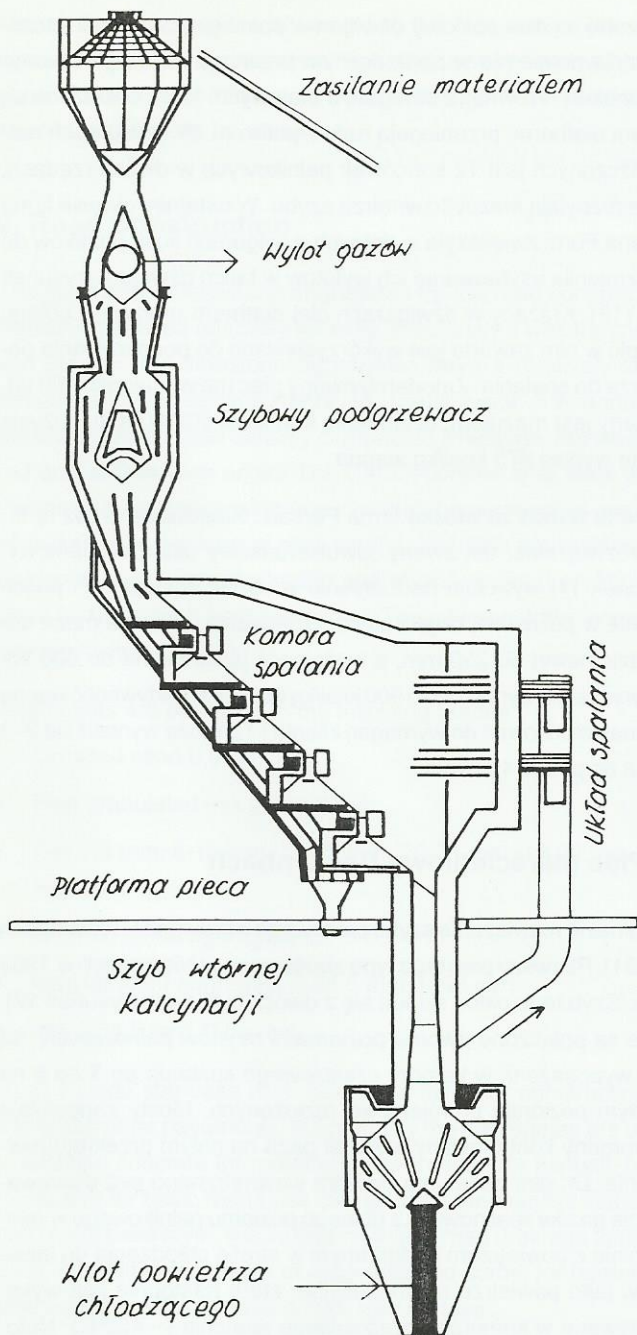
Rys. 7. Piec wielokomorowy
Fig. 7. Multichamber kiln



Rys. 6. Piec dwuskośny
Fig. 6. Double inclined kiln

5.1.3. Piec szybowy CID

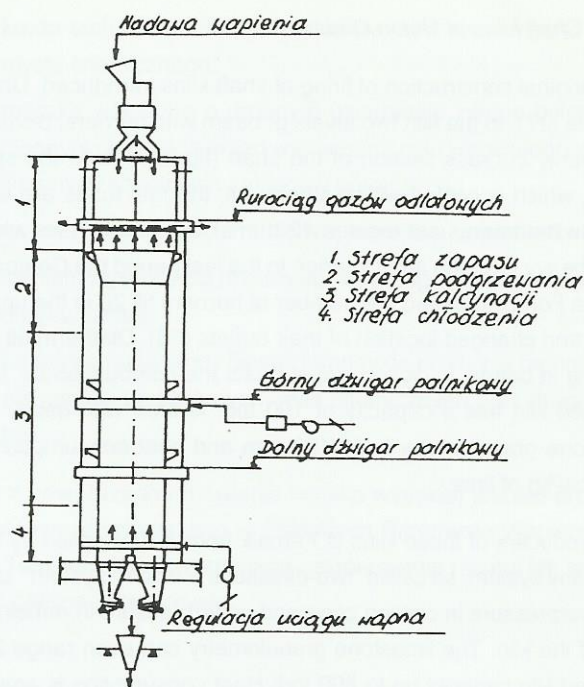
Jest to bardzo oryginalna konstrukcja pieca ze wspomaganym ruchem wsadu (16). Kamień wapienny spoczywa na schodkowo usytuowanych platformach, których jest zwykle 4 do 5 (rysunek 8). Platformy napędzane są hydraulicznie i wykonując ruchy posuwisto-zwrotne wywołują przesuwanie się kamienia w dół szybu. Z ostatniej platformy materiał spada do szybu końcowej kalcynacji, a stąd do szybu chłodnika. Palniki są usytuowane parami na dwóch poziomach w stosunku do przepływu materiału i są zasilane



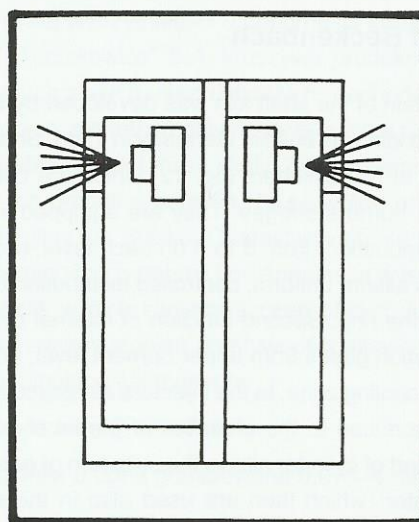
Rys. 8. Piec CID
Fig. 8. Kiln CID

usually in the number of 4 to 5 (fig. 8). The platforms are drive hydraulically and are making reciprocating movements evoking the shifting of material down the shaft. From the last platform material drops down to the shaft of final calcination, and from here to cooling zone of the shaft. The burners are situated on two levels in relation to the material shifting and are fed with primary and secondary air. Primary air is heated cooling lime in the shaft. Hot air is sucked through by-pass and over passing the shaft of final calcination is feed to the burners. Lime granulometry is 10/45 mm. Fuel: gas, light and heavy oil, coal dust. Capacity around 120 tpd. CaCO_3 in lime maximum 4%. Heat consumption 925 kcal/kg CaO. Lime reactivity $T_{60} < 1$ minutes.

Producer: Consultants Industry and Development GmbH, Düsseldorf.



Rys. 9. Piec Union Carbide firmy Fercalx
Fig. 9. Fercalx kiln



Rys. 10. Usytuowanie palników w belce
Fig. 10. Burners location in the beam

powietrzem pierwotnym i wtórnym. Powietrze pierwotne podgrzewa się chłodząc wapno w szybie. Gorące powietrze jest odciągane bocznikiem i omijając szyb końcowej dekarbonizacji jest dostarczane do palników. Uziarnienie wapienia 10/45 mm. Paliwo: gaz, mazut, olej lekki, pył węglowy. Wydajność ~ 120 t/d. CaCO_3 w wapnie maksimum 4%. Zużycie ciepła 925 kcal/kg CaO. Reaktywność wapna $T_{60} < 1$ min.

Producent: Consultants Industry and Development GmbH, Düsseldorf.

5.1.4. Piece szybowe Union Carbide

Bardzo oryginalne rozwiązanie opalania pieców szybowych wprowadziła amerykańska firma Union Carbide (17). Do pieca wpro-

5.1.4. Shaft kilns of Union Carbide

Very original construction of firing of shaft kilns introduced Union Carbide (17). In the kiln two levels of beam with burners, distributed evenly in cross section of the shaft (fig. 8). Inside the steel beam, which is cooled with diatherm oil, the fuel tubes are situated. In the beams are located 12 burner tips in two rows which inject heavy oil to the shaft interior. In the last period the Company Italiana Forni increased the number of burners till 20 in the upper beam and changed location of their outlets (18). Diatherm oil circulating in beams in closed circuit heats the combustion air. Modernized kiln has a capacity of 100 tpd, is fired with heavy oil, limestone granulometry is 50/100 mm and heat consumption is 975 kcal/kg of lime.

The producers of these kilns is Fercalx from Italy. Applied by this Company system, so called "two-directions pressure system" evokes overpressure in cooling zone and underpressure in remaining part of the kiln. The limestone granulometry can even range 250 mm and kiln capacity up to 800 tpd. Heat consumption is around 900 kcal/kg CaO. Lime reactivity can be adjusted to customers needs and T_{60} can be from 2-3 min up to 10 min and more.

5. Ring kiln of Beckenbach

Original construction of the shaft kiln was developed by Beckenbach (19-21). First kiln was build in Germany in 1963. Shaft of this kiln is composed of two cylinders (fig. 12) which are connected with two levels of burners bridges. They are equipped in chambers of partial combustion, from 3 to 6 on each level, radially distributed. Bridges assure uniform, controlled distribution of gas in whole section of the ring. Second function of internal cylinder is supply of combustion gases from upper burners level, in mixture with air heated in cooling zone, to the injectors as recirculating air, which is then introduced to the chamber of partial combustion. However, upper part of cylinder allows the succsion of gases through the recuperator which then are used also in the burners. Separate fan drives in the air cooling internal cylinder which then is also used as secondary combustion air having temperature about 200°C.

The kiln is functioning in countercurrent. However, below the upper burners there is a cocurrent section which is shown on fig. 11. 40-50% of the combustion air is introduced to the kiln as air cooling lime, about 30% of combustion air is heated to about 500°C in recuperator and is transporting fuel in the injector (fig. 12). Remaining 25% of combustion air is the air cooling internal cylinder. About 2/3 of this air is used as a secondary air in burners and 1/3 is leaving the kiln with exit gases. Kilns are feed in general with limestone of granulometry 20-70 mm or 70-150 mm, but they can also burn the fraction 120-220 mm.

Heat consumption is about 900 kcal/kg CaO and energy consumption about 20 kWh/t of lime. CO₂ content is in general 1%, but can also be decreased to 0.3%. Similarly in very large range the reactivity of lime can be changed, from 25 sec to 14 min. The capacity

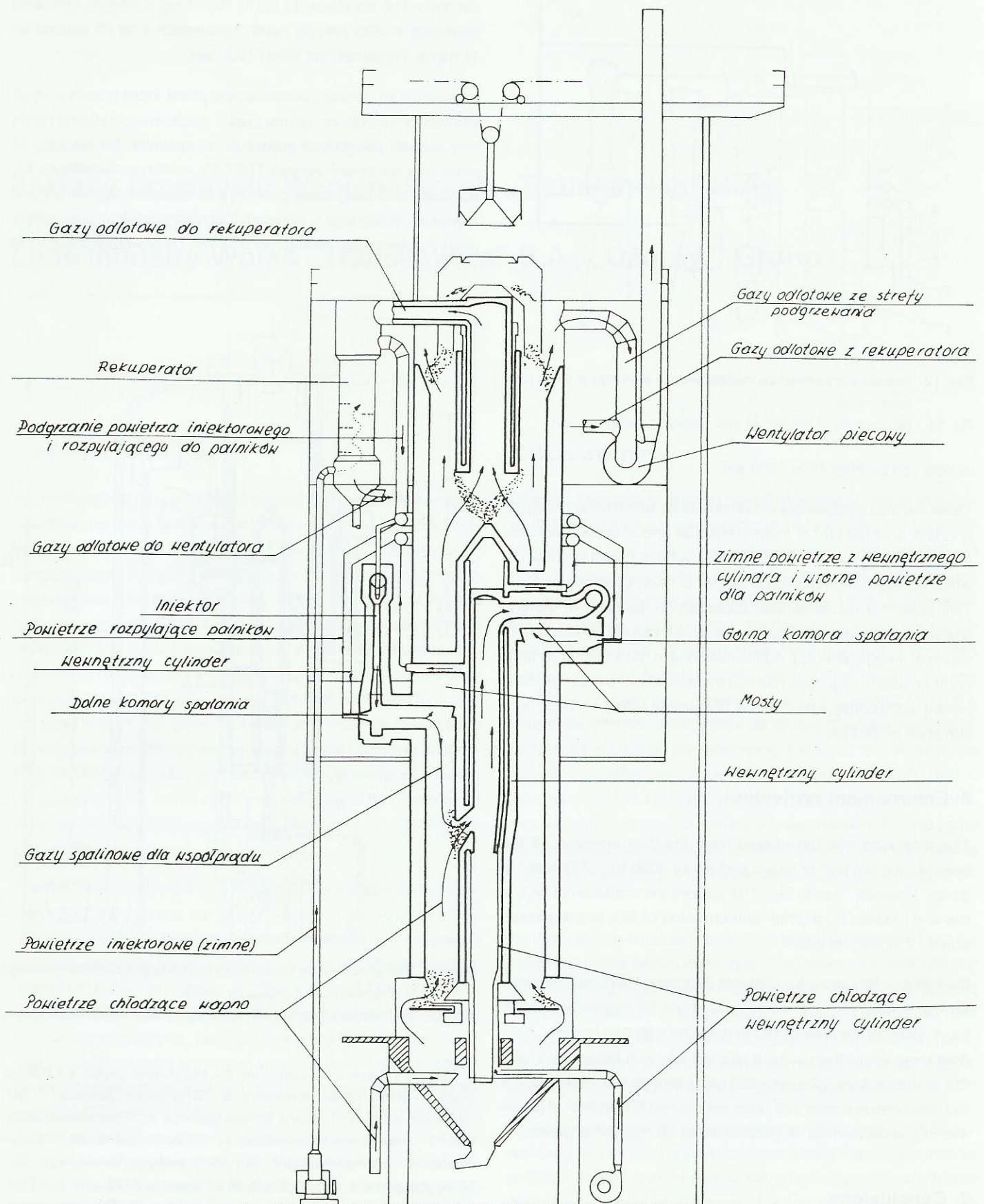
wadzone są dwa poziomy dźwigarów palnikowych, rozmieszczonych równomiernie w poprzecznym przekroju szybu piecowego (rysunek 8). Wewnątrz dźwigarów stalowych, które chłodzone są olejem diatherm, przebiegają rurki z paliwem. W dźwigarach rozmieszczonych jest 12 końcówek palnikowych w dwóch rzędach, które rozpylają mazut do wnętrza szybu. W ostatnim okresie firma Italiana Forni zwiększyła w dolnych dźwigarach ilość palników do 20 i zmieniła usytuowanie ich wylotów w belce dźwigara (rysunek 10), (18). Krążący w dźwigarach olej diatherm pracuje w obiegu i ciepło w nim zawarte jest wykorzystywane do podgrzewania powietrza do spalania. Zmodernizowany piec ma wydajność 100 t/d, opalany jest mazutem, uziarnienie kamienia 50/100 mm, zużycie ciepła wynosi 975 kcal/kg wapna.

Piece te wytwarza włoska firma Fercalx. Stosowane przez tę firmę rozwiązanie, tak zwany „dwukierunkowy układ ciśnieniowy” (rysunek 11) wywołuje nadciśnienie w strefie chłodzenia i podciśnienie w pozostałej części pieca. Uziarnienie wapienia może dochodzić nawet do 250 mm, a wydajność pieca nawet do 800 t/d. Zużycie ciepła wynosi około 900 kcal/kg wapna. Reaktywność wapna można dostosować do wymagań klienta i T_{60} może wynosić od 2-3 minut do ponad 10 minut.

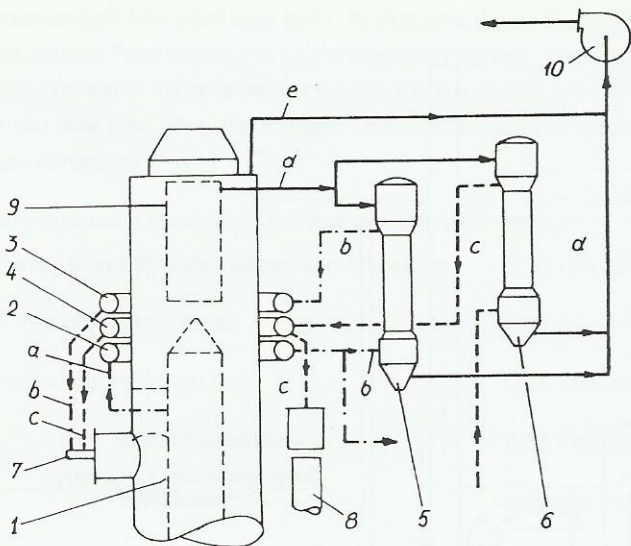
6. Piec pierścieniowy Beckenbach

Oryginalne rozwiązanie szybu piecowego wprowadził Beckenbach (19-21). Pierwszy piec tego typu zbudowano w Niemczech w 1963 roku. Szyb tego pieca składa się z dwóch cylindrów (rysunek 12), które są połączone dwoma poziomymi mostkami palnikowymi. Są one wyposażone w komory częściowego spalania po 3 do 6 na każdym poziomie promieniowo rozłożonych. Mostki zapewniają jednorodny kontrolowany rozdział gazu na całym przekroju pierścienia. Drugim zadaniem cylindra wewnętrznego jest doprowadzenie gazów spalinowych z dolnego poziomu palnikowego w mieszaniu z powietrzem podgrzany w strefie chłodzenia do iniektorów jako powietrze recyrkulacyjne, które następnie jest wykorzystywane w komorach częściowego spalania (~ 450°C). Natomiast górna część cylindra pozwala na czerpanie gazów poprzez rekuperator, które również wykorzystane są w palnikach. Osobny wentylator tłoczy powietrze chłodzące wewnętrzny cylinder, a następnie jest również wykorzystywane jako powietrze wtórne do spalania o temperaturze około 200°C.

Piec pracuje w przeciwnym kierunku, jednak poniżej dolnych palników przypada odcinek współprądowy, który pokazano na rysunku 11. 40-50% powietrza do spalania podawane do pieca jako powietrze chłodzące wapno, około 30% powietrza do spalania jest podgrzane do około 500°C rekuperatorze i służy jako gaz w iniektorze transportujący paliwo (rysunek 12). Pozostałe 25% powietrza do spalania pochodzi z powietrza chłodzącego wewnętrzny cylinder. Około 2/3 tego powietrza jest wykorzystane jako powietrze wtórne w palnikach, a 1/3 jest wyrzucana do atmosfery razem z gazami odlotowymi. Piece zasilane są na ogół frakcjami kamienia 20-70 mm lub 70-150 mm, lecz mogą pracować także na frakcji 120-220 mm. Zużycie ciepła wynosi około 900 kcal/kg CaO, a energii



Rys. 11. Beckenbach piec pierścieniowy z górnym cylindrem wewnętrznym
 Fig. 11. Beckenbach ring kiln with upper internal cylinder



Rys. 12. Rekuperatory powietrza iniektorowego i wtórnego w piecu pierścieniowym

Fig. 12. Recuperator of injector air and secondary air in ring kiln

of kilns can be from 75 to 1000 tpd.

There are also varieties of kiln constructions which differ principally in lack of upper part of internal cylinder and have different systems of heating air. On the fig. 14 the system Treivo is shown in which additional combustion chamber is heating combustion air. This system is recommended especially in the case of burning limestone with higher alkalis content, which can cause blocking of classical recuperator (22). Additionally due to much higher air temperature used in injectors (900°C) the quantity of air can be diminished significantly which has a favourable effect on heat consumption of the kiln.

6. Environment protection

The shaft kilns with mixed feed have the dust emission on the level of 200 mg/nm³ of gases and about 8000 mg of CO/nm³ of gases. However, due to high CO content the emission of NO_x is low and reaches 60 mg/nm³ and emission of SO₂ is even lower, about 12 mg/nm³ of gases.

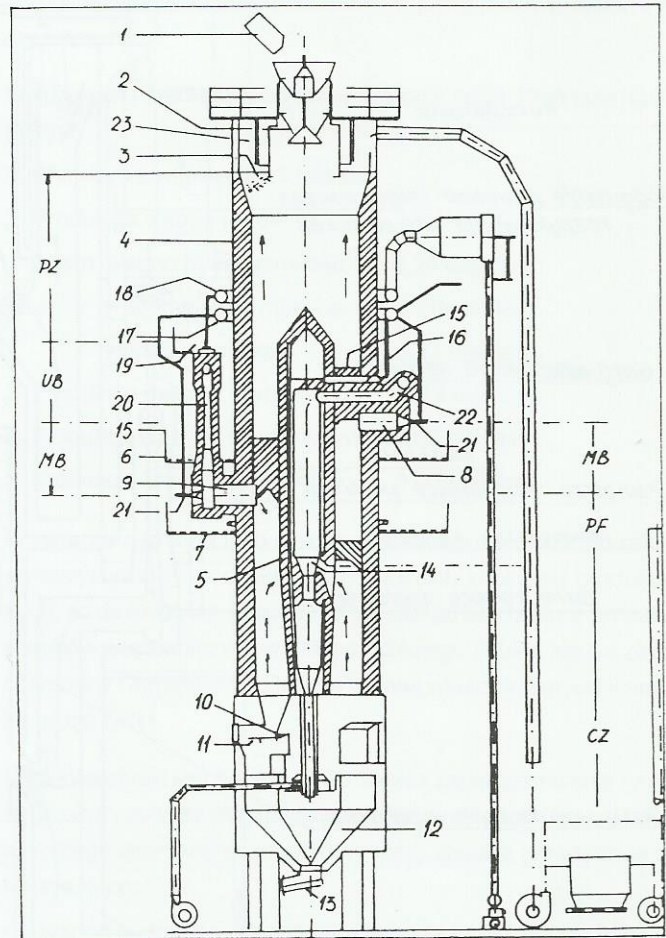
Modern lime kilns are equipped with dedusting filters and the emission of dust is very low, in general about 20 mg/nm³ of gases. Much lower is the level of CO in the kilns with fuel burners, hundred times lower than in case of shaft kiln with mixed feed, and this emission does not exceed 60 mg/nm³ of gases. However, the NO_x emission is similar and does not exceed 50 mg/nm³ of gases and SO₂ is also similar, in general about 10 mg/nm³ of gases.

7. Conclusions

Reasuming one can conclude that the modern shaft kilns use limestone even from about 20 mm of grain size and can produce lime of very differentiated reactivity. Heat consumption is low and in general does not exceed 850 kcal/kg CaO.

elektrycznej 20 kWh/t wapna. Pozostałość CO₂ zwykle wynosi 1%, ale może być obniżona do 0,3%. Podobnie w bardzo szerokich granicach można zmienić reaktywność wapna od 25 sekund do 14 minut. Wydajność od 75 do 1000 ton.

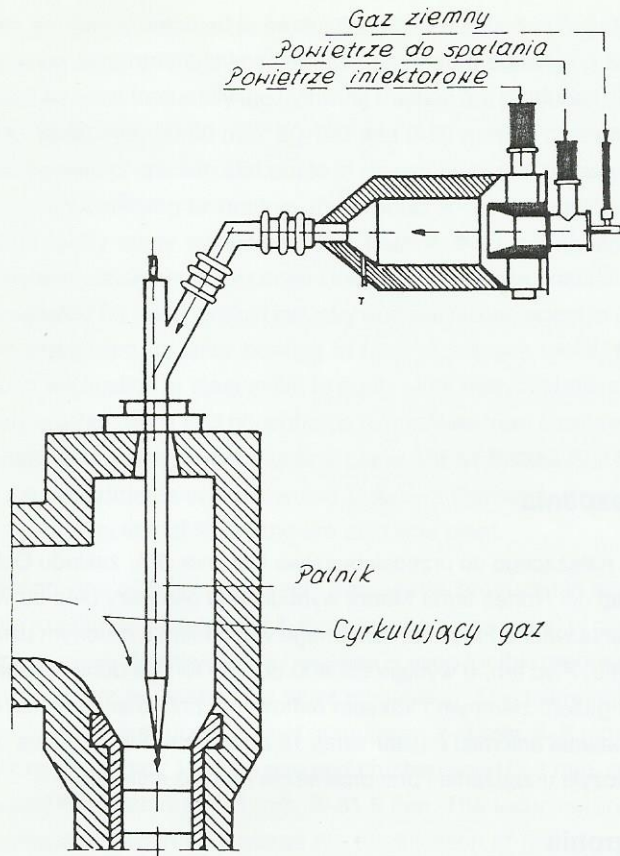
Stosowane są odmiany konstrukcyjne pieca, które przede wszystkim różnią się brakiem górnej części środkowego cylindra i mają inny sposób podgrzania powietrza do spalania. Na rysunku 14 pokazano tak zwany system TREIVO, w którym dodatkowa komora spalania podgrzewa powietrze do spalania. System ten jest zalecany szczególnie w przypadku stosowania kamienia wapiennego o zwiększonej zawartości alkaliów, co powoduje zarastanie



Rys. 13. Piec pierścieniowy Beckenbach bez górnego cylindra środkowego z podgrzewaczem powietrza LUVUO

Fig. 13. Beckenbach Ring kiln without upper cylinder with air heating system LUVUO

1 - Skip; 2 - Zamknięcie zasypowe; 3 - Napełnienie szybu; 4 - Płaszcz pieca; 5 - Dolny cylinder wewnętrzny; 6 - Górny poziom palników; 7 - Dolny poziom palników; 8 - Górna komora spalania; 9 - Dolna komora spalania; 10 - Popychacze promieniowe; 11 - Stoły wciągowe; 12 - Zbiornik wapna; 13 - Rynna wibracyjna; 14 - Wloty gazu recykulacyjnego; 15 - Mosty z materiałów ogniotrwiałych; 16 - Przewody chłodzące; 17 - Przewód pierścieniowy powietrza chłodzącego płaszcz; 18 - Przewód pierścieniowy powietrza; 19 - Iniektory; 21 - Palniki; 22 - Przewody recykulacyjnego gazu; 23 - Przewód pierścieniowy dla gazów odlotowych; PZ - Strefa podgrzewania; UB - Górna strefa przeciwwądowa; MB - Środkowa strefa przeciwwądowa; PF - Strefa współwądowa; CZ - Strefa chłodzenia.



Rys. 14. System Treivo do podgrzewania powietrza
Fig. 14. Heating air system Treivo

The modern kiln are also friendly for the environment. The dust emission is controlled and does not exceed 20 mg/nm^3 of gases as well as the gaseous emission is also very low.

klasycznego rekuperatora (22).

Ponadto, dzięki znacznie wyższej temperaturze powietrza stosowanego w iniektorach (900°C) ilość tego powietrza może być dwukrotnie zmniejszona, co korzystnie odbija się na ogólnym zużyciu ciepła przez piec.

7. Ochrona środowiska

Piece na wsad mieszany mają emisję pyłu na poziomie około 200 mg/nm^3 gazów oraz około 8000 mg CO/nm^3 gazów. Natomiast w związku z występowaniem w gazach CO emisja NO_x jest mała i wynosi około 60 mg/nm^3 , a SO_2 jeszcze mniejsza, około 12 mg/nm^3 gazów.

Nowoczesne piece wapiennicze są wyposażone w urządzenia odpylające gazy i w związku z tym emisja pyłu jest minimalna, zwykle 20 mg/nm^3 , jest więc dziesięciokrotnie niższa. Znacznie niższy jest poziom CO i nie przekracza 60 mg/nm^3 gazów. Natomiast poziom emisji NO_x jest zbliżony i nie przekracza 50 mg/nm^3 , zaś SO_2 także zbliżony, wynosi zwykle około 10 mg/nm^3 gazów.

8. Wnioski

Reasumując można powiedzieć, że nowoczesne piece szybowe mogą wypalać wapień nawet o uziarnieniu 20 mm i wytwarzać wapno o bardzo zróżnicowanej reaktywności. Zużycie ciepła jest niewielkie i nie przekracza 850 kcal/kg wapna. Równocześnie piece te są przyjazne dla środowiska i mają 10 razy mniejszą emisję pyłu oraz 100 razy mniejszą emisję CO. Zwłaszcza zmniejszenie tak znacznej emisji wysoko szkodliwego gazu, jakim jest CO, jest niezwykle ważne dla ochrony środowiska.

References / Literatura

1. J. Fakstrop, Cement Wapno Gips str. 143, 1980
2. J. F. Breton, Ciments Bétons Plâtres Chaux, nr 759, str. 89, 1986
3. H. Bock, Zement-Kalk-Gips, str. 129, 1973
4. J. Theil, Cement Wapno Gips, str. 149, 1980
5. J. Theil, Cement Wapno Gips, str. 140, 1980
6. W. Höltje, Zement-Kalk-Gips, str. 467, 1991
7. P. Meisel, Zement-Kalk-Gips, str. 278, 1992
8. F. Hebler, Zement-Kalk-Gips, str. 44, 1995
9. F. Bartu, J. Schwegel, Cement Wapno Gips, str. 186, 1971
10. E. Füssl, F. Jahls, Zement-Kalk-Gips, str. 290, 1982
11. A. Descampe, Ciments Bétons Plâtres Chaux nr 761, str. 235, 1986
12. H. Gundlach, Zement-Kalk-Gips, str. 225 1986
13. F. D. Moles, B. G. Jenkins, Ciments, Bétons, Plâtres, chaux, nr 788 – 1/91, str. 55
14. V. Azbe, Rock Products 1957, nr 9, str. 95
15. V. Azbe, Rock Products 1969, nr 7, str. 76
16. F. Hebler, Zement-Kalk-Gips Nr 1/1995, str. 44
17. E. Schiele i L. W. Berens, Kalk, Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf 1972
18. A. Brunello, World Cement, July 1996, str. 10
19. K. Beckenbach, Zement-Kalk-Gips Nr 5/1970, str. 206
20. K. Beckenbach, Zement-Kalk-Gips Nr 4/1974, str. 182
21. V. Beckenbach I P. Zeisel, Zement-Kalk-Gips Nr 6/1982, str. 279
22. W. Arnold, World Cement, February 1997, str. 28