

3. PROCESY CIEPLNE W PIECACH

3.1. Spalanie paliw

Spalanie paliw jest intensywną egzotermiczną reakcją chemiczną utleniania, zachodzącą pomiędzy palnymi składnikami paliw i tlenem z powietrza. Zewnętrznym przejawem spalania jest płomień, a efektem wydzielonego ciepła jest wysoka temperatura płomienia i powstałych gazów spalinowych. Najwyższą temperaturę spalania uzyskuje się, prowadząc spalanie przy najmniejszej (teoretycznej) ilości tlenu tak, aby wszystkie składniki palne utleniły się do CO_2 , H_2O , SO_2 , a w spalinach nie występował wolny tlen. Spalanie z nadmiarem tlenu (powietrza) zapewnia wprawdzie zupełność procesu spalania, ale obniża temperaturę spalania (nadmiarowe powietrze daje efekt schładzania). Spalanie z niedomiarem tlenu powoduje również straty ciepła, bowiem część składników palnych zostaje nie spalona i przechodzi do spalin lub popiołu.

Spaliny w warunkach praktycznych mają temperaturę powyżej 100°C , a więc zawierają parę wodną i nazywają się wilgotnymi. Przy oziębieniu spalin do poniżej tej temperatury następuje wykroplenie pary wodnej, a spaliny nazywają się suchymi.

3.1.1. Wartość opałowa paliw

Wielkością charakteryzującą paliwa jest ich wartość opałowa. Jest to ilość ciepła wydzielona przy spaleniu 1 kg paliwa stałego albo ciekłego lub 1m^3 paliwa gazowego. Wartość opałowa górna W_g dotyczy spalin suchych. Wartość opałowa dolna W_d dotyczy spalania z powstaniem spalin wilgotnych. Ilość wydzielonego ciepła jest wtedy pomniejszona o ciepło parowania wody, wynoszące 2500 kJ/kg . Wartości opałowe wyznacza się spalając paliwa w kalorymetrze.

Pomiędzy obydwiema wartościami opałowymi istnieją zależności:

- dla paliw stałych i ciekłych

$$W_d = W_g - 25(w_p + 9H) \text{ [kJ/kg]} \quad (3.1)$$

- dla paliw gazowych

$$W_d = W_g - 25 w_s \text{ [kJ/m}^3\text{]} \quad (3.2)$$

gdzie:

w_p - wilgotność paliwa, [%]

w_s - zawartość pary wodnej w spalinach, [kg/m³]

H - " H₂ w paliwie, [%]

Wartość opałowa paliwa zależy od rodzaju i ilości składników palnych w paliwie. Znając procentowe zawartości składników palnych w paliwie oraz ich ciepła spalania, można wartość opałową paliwa określić na drodze obliczeń. I tak w przybliżeniu

- dla paliw stałych i ciekłych

$$W_d = 339C + 1256H - 109(O - S) - 25(9H + w_p) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (3.3)$$

- dla paliw gazowych wartość opałowa jest sumą wartości opałowych poszczególnych składników palnych pomnożonych przez ich udziały w paliwie, np.

$$W_d = 108H_2 + 127 \text{ CO} + 231H_2S + 358CH_4 + 599C_mH_n \quad [\text{kJ/m}^3] \quad (3.4)$$

gdzie:

C, H, O, S - zawartość węgla, wodoru, tlenu, siarki w paliwie, [%]

H₂, CO, H₂S, CH₄, C_mH_n - zawartość gazów palnych w paliwie, [%]

Przeciętne wartości opałowe niektórych paliw przedstawia tablica 3.1.

Tablica 3.1. Wartości opałowe niektórych paliw.

Rodzaj paliwa	W _d [MJ/kg} lub [MJ/m ³]*
węgiel kamienny	27 - 34
koks	28 - 30
olej opałowy	40 - 42
mazut	44
smoła	38
gaz czadnicowy	3,3 - 6,3
gaz koksowniczy	16 - 18
gaz wielkopiecowy	3,8 - 4,6
gaz ziemny	35 - 37

* - dla paliw gazowych

Dla umożliwienia porównywania zużycia ciepła w różnych piecach, opalanych różnymi paliwami, wprowadzone zostało pojęcie paliwa umownego, dla którego wartość W_d=30 000 kJ/kg.

Ilość paliwa umownego równoważną rzeczywistemu zużyciu określonego paliwa w piecu oblicza się wg wzoru

$$B_u = B_{rz} \frac{W_d}{3000}, \quad \text{kg} \quad (3.5)$$

gdzie: B_u - zużycie paliwa umownego, kg
 B_{rz} - " " rzeczywistego, kg
 W_d - wartość opałowa paliwa rzeczywistego, kJ/kg

3.1.2. Zapotrzebowanie na powietrze do spalania

Minimalne (teoretyczne) zapotrzebowanie tlenu do spalania paliw jest sumą zapotrzebowania ich palnych składników. Składniki i gazy niepalne pozostają po spalaniu w tej samej ilości. Zapotrzebowanie na tlen wylicza się więc z równań reakcji utleniania. Dla przykładu, z reakcji $\text{CO} + 1/2 \text{O}_2 = \text{CO}_2$ wynika, że do spalenia 1 m^3 CO potrzeba $0,5 \text{ m}^3$ tlenu. Produktem spalania będzie $1 \text{ m}^3 \text{CO}_2$. Źródłem tlenu do spalania jest powietrze. Dla obliczeń procesu spalania przyjmuje się, że zawiera ono 21% tlenu i 79% azotu. Dla podanej reakcji dla pełnego spalania 1 m^3 CO trzeba więc dostarczyć $0,5/0,21 = 2,38 \text{ m}^3$ powietrza. Obliczenia zapotrzebowania powietrza spalania prowadzi się w praktyce metodami uproszczonymi: termodynamiczną – gdy znany jest skład chemiczny paliw lub empiryczną – gdy znane są ich wartości opałowe.

Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza V_0 wynosi:

- dla paliw stałych i ciekłych

$$V_0 = \frac{n}{21} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (3.6)$$

- dla paliw gazowych

$$V_0 = \frac{1}{21} \left(\frac{\text{H}_2}{2} + \frac{\text{CO}}{2} + 2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_4 - \text{O}_2 \right) [\text{m}^3/\text{m}^3] \quad (3.7)$$

gdzie:

C, H, S, O - zaw. składników w paliwie, %

H_2 , CO, CH_4 , C_2H_4 , O_2 - zaw. składników w paliwie, %

UWAGA:

$n = 22,71$ dla warunków umownych układu SI ($p = 0,1 \text{ MPa}$, $T = 273,15 \text{ K}$)

$n = 22,42$ dla warunków umownych ($p = 1 \text{ atm}$, $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$),

lub też

– dla paliw stałych:

$$V_o = 0,245 \frac{W_d}{1000} + 0,507 \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (3.8)$$

– dla paliw ciekłych:

$$V_o = 0,213 \frac{W_d}{1000} + 1,720 \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (3.9)$$

– dla paliw gazowych:

$W_d < 12500 \text{ kJ/m}^3$

$$V_o = 0,210 \frac{W_d}{1000} \quad [\text{m}^3/\text{m}^3] \quad (3.10)$$

$W_d > 12500 \text{ kJ/m}^3$

$$V_o = 0,260 \frac{W_d}{1000} - 0,239 \quad [\text{m}^3/\text{m}^3] \quad (3.11)$$

$W_d > 34500 \text{ kJ/m}^3$

$$V_o = 0,264 \frac{W_d}{1000} + 0,02 \quad [\text{m}^3/\text{m}^3] \quad (3.12)$$

Przedstawione zależności pozwalają wyliczyć minimalne (teoretyczne) zapotrzebowanie powietrza. Spalanie paliw z tą minimalną ilością powietrza wymaga jednak idealnych warunków, a w szczególności bardzo intensywnego wymieszania. Stan taki jest trudny do uzyskania w praktyce, stąd spalanie prowadzi się zwykle z pewnym nadmiarem powietrza, określanym tzw. współczynnikiem nadmiaru powietrza. Rzeczywista ilość powietrza potrzebnego do spalania określona jest wtedy zależnością

$$V_{ps} = \lambda V_o \quad [\text{m}^3] \quad (3.13)$$

lub

$$V_{pw} = V_{ps} (1 + 0,0016 d) \quad [\text{m}^3] \quad (3.14)$$

gdzie:

V_o – teoretyczne zapotrzebowanie powietrza, $[\text{m}^3]$

V_{ps} – rzeczywista ilość powietrza suchego, $[\text{m}^3]$

V_{pw} – " " " wilgotnego, $[\text{m}^3]$

d – zawartość wilgoci w powietrzu, $[\text{g H}_2\text{O}/\text{kg pow.such.}]$

λ – współczynnik nadmiaru powietrza

Wilgoć zawarta w powietrzu zwiększa jego objętość praktycznie tylko o ok. 1,5%, stąd w obliczeniach technicznych pieców można ją pominąć i stosować tylko wzory na objętość powietrza suchego.

Wartość współczynnika nadmiaru powietrza zależy przede wszystkim od rodzaju spalanego paliwa, sposobu jego spalania, a także i od konstrukcji paleniska czy palnika i warunków ich eksploatacji. Orientacyjne wartości współczynników nadmiaru powietrza wynoszą:

- paliwa gazowe $\lambda = 1,05 \div 1,20$,
- paliwa ciekłe $\lambda = 1,10 \div 1,20$,
- paliwa stałe - pył $\lambda = 1,05 \div 1,30$,
- paliwa stałe - warstwa $\lambda = 1,40 \div 2,20$.

Zmiana współczynnika nadmiaru powietrza powoduje zmianę ilości i składu produktów spalania. Przy jego wzroście w spalinach wzrasta ilość N_2 i O_2 natomiast maleje zawartość CO_2 , H_2O i SO_2 . Badając więc skład spalin można określić wartość rzeczywistego współczynnika nadmiaru powietrza i na tej podstawie kontrolować i korygować proces spalania.

3.1.3. Ilość spalin

Produktami spalania paliw są spaliny składające się z CO_2 , H_2O , SO_2 , O_2 i N_2 . Objętość spalin jest sumą objętości gazów powstałych ze spalania poszczególnych składników palnych paliwa, powiększoną o ilość wprowadzonego z powietrzem azotu

Teoretyczną ilość spalin wilgotnych można wyliczyć tak jak poprzednio z reakcji utleniania. Dla podanej wyżej reakcji spalania CO ilość powstałych spalin wyniesie $2,88 \text{ Nm}^3$, z czego $1,0 \text{ Nm}^3$ przypada na powstały CO_2 , a $2,38 \cdot 0,79 = 1,88 \text{ Nm}^3$ na azot wnoszony w $2,38 \text{ Nm}^3$ powietrza. W praktyce dla obliczeń ilości spalin korzysta się z podanych w podrozdziale 3.1.2. metod.

Teoretyczna ilość spalin wilgotnych V_{os} wynosi więc

$$V_{os} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} \quad [\text{m}^3/\text{kg} \text{ lub } \text{m}^3] \quad (3.15)$$

przy czym:

– dla paliw stałych i ciekłych:

$$V_{CO_2} = \frac{n}{12} C \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (3.16)$$

$$V_{SO_2} = \frac{n}{32} S \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (3.17)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{n}{18} (9H + w_p) \text{ [m}^3/\text{kg]} \quad (3.18)$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{n}{28} N_2 + 0,79V_o \text{ [m}^3/\text{kg]} \quad (3.19)$$

dla paliw gazowych:

$$V_{\text{CO}_2} = \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_2 + 2\text{C}_2\text{H}_4 \text{ [m}^3/\text{m}^3] \quad (3.20)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_2 \text{ [m}^3/\text{m}^3] \quad (3.21)$$

$$V_{\text{N}_2} = N_2 + 0,79V_o \text{ [m}^3/\text{m}^3] \quad (3.22)$$

lub też

-dla paliw stałych:

$$V_{\text{os}} = 0,230 \frac{W_d}{1000} + 1,393 \text{ [m}^3/\text{kg]} \quad (3.23)$$

-dla paliw ciekłych:

$$V_{\text{os}} = 0,269 \frac{W_d}{1000} \text{ [m}^3/\text{kg]} \quad (3.24)$$

-dla paliw gazowych

$$W_d < 12500 \text{ kJ/m} \quad V_{\text{os}} = 1,173 \frac{W_d}{1000} + 1,00 \text{ [m}^3/\text{m}^3] \quad (3.25)$$

$$W_d > 12500 \text{ kJ/m} \quad V_{\text{os}} = 0,259 \frac{W_d}{1000} + 0,485 \text{ [m}^3/\text{m}^3] \quad (3.26)$$

$$W_d > 34500 \text{ kJ/m} \quad V_{\text{os}} = 0,282 \frac{W_d}{1000} + 0,40 \text{ [m}^3/\text{m}^3] \quad (3.27)$$

Rzeczywista ilość powstałych spalin wilgotnych uwzględnia współczynnik nadmiaru powietrza spalania. Nadmiarowa ilość powietrza wprowadza tlen w ilości:

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot V_o (\lambda - 1) \text{ [m}^3/\text{kg]} \text{ lub } \text{[m}^3/\text{m}^3] \quad (3.28)$$

oraz azot w ilości:

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot V_o (\lambda - 1) \text{ [m}^3/\text{kg]} \text{ lub } \text{[m}^3/\text{m}^3] \quad (3.29)$$

Rzeczywista ilość spalin będzie więc powiększona o te wartości, tj.:

$$V_w = V_{os} + V_{O_2} + V_{N_2} \quad [m^3/kg] \text{ lub } [m^3/m^3] \quad (3.30)$$

lub

$$V_w = V_{os} + V_o(\lambda - 1) \quad [m^3/kg] \text{ lub } [m^3/m^3] \quad (3.31)$$

Przykład obliczania procesu spalania paliwa

DANE: gaz ziemny o składzie: 93% CH₄, 2,5% C_mH_n, 0,2% CO₂, 3,3% N₂ i 1,0% wilgoci. Powietrze atmosferyczne zawiera 10g H₂O/kg powietrza suchego. Współczynnik nadmiaru powietrza λ=1,2.

– wartość opałowa gazu

$$W_d = 358 \cdot 93 + 599 \cdot 2,5 = 34792 \text{ kJ/m}^3,$$

– teoretyczne zapotrzebowanie powietrza suchego

$$V_o = \frac{100}{21} \cdot (2 \cdot 93 + 3 \cdot 2,5) = 9,21 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

(dla uproszczenia dla C_mH_n przyjęto mnożnik 3)

$$\text{lub} \quad V_o = 0,264 \cdot \frac{34792}{1000} + 0,02 = 9,19 \text{ m}^3/\text{m}^3,$$

– rzeczywiste zapotrzebowanie powietrza suchego

$$V_{ps} = V_o \cdot \lambda = 9,20 \cdot 1,2 = 11,04 \text{ m}^3/\text{m}^3,$$

– rzeczywiste zapotrzebowanie powietrza atmosferycznego (wilgotnego)

$$V_{pw} = 11,04 \cdot (1 + 0,0016 \cdot 10) = 11,22 \text{ m}^3/\text{m}^3,$$

– teoretyczna ilość spalin wilgotnych

$$V_{os} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}$$
$$V_{CO_2} = \frac{1}{100}(0,2 + 93 + 2,5) = 0,96 \text{ m}^3,$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1}{100}(1 + 2 \cdot 9,3 + 3 \cdot 2,5) = 1,95\text{m}^3$$

$$V_{\text{N}_2} = 3,3 \cdot \frac{1}{100} + 0,79 \cdot 9,2 = 7,30\text{m}^3$$

razem $V_{\text{os}} = 10,21 \text{ m}^3$

lub $V_{\text{os}} = 0,282 \cdot 34792/1000 + 0,40 = 10,21 \text{ m}^3$

– rzeczywista ilość spalin powiększona jest o tlen i azot wprowadzone z powietrzem nadmiarowym:

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot 9,2(1,2 - 1) = 0,39\text{m}^3,$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot 9,2(1,2 - 1) = 1,45\text{m}^3,$$

czyli $V_{\text{w}} = 10,21 + 0,39 + 1,45 = 12,05 \text{ m}^3/\text{m}^3,$

a skład spalin będzie następujący:

$$\text{CO}_2 = 0,96 \cdot \frac{100}{12,05} = 7,9\%$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1,95 \cdot \frac{100}{12,05} = 16,3\%$$

$$\text{N}_2 = (7,30 + 1,45) \cdot \frac{100}{12,5} = 72,6\%$$

$$\text{O}_2 = 0,39 \cdot \frac{100}{12,05} = 3,2\%$$

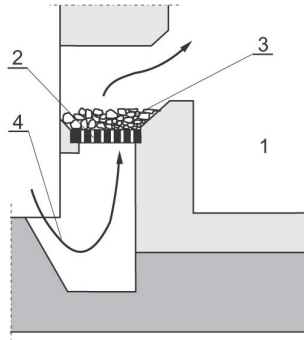
3.1.4. Urządzenia do spalania paliw

Urządzenia i sposoby spalania są zróżnicowane w zależności od rodzaju stosowanych paliw.

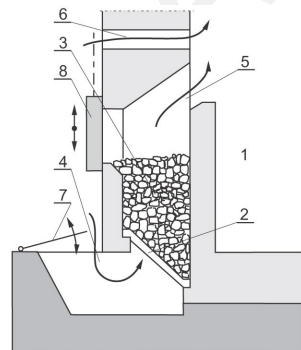
Spalanie paliw stałych może się odbywać kilkoma sposobami:

- w palenisku rusztowym,
- w palenisku półgazowym,
- bezpośrednio wewnątrz wsadu,
- w palenisku pyłowym.

Paliwa stałe kawałkowe spalane są w oddzielnych komorach usytuowanych w obrębie obmurza pieca lub wysuniętych na zewnątrz. W palenisku rusztowym (rys.3.1) proces spalania odbywa się w warstwie na ruszcie, przy czym całe powietrze potrzebne do spalania (z dużym nadmiarem) podawane jest pod ruszt. Do komory roboczej przechodzą tylko gorące spaliny. Wadą takiego rozwiązania jest to, że maksymalną temperaturę uzyskuje się nie w komorze roboczej, a w palenisku.



Rys. 3.1. Palenisko rusztowe: 1 – wnętrze pieca, 2 – ruszt, 3 – warstwa paliwa, 4 – dopływ powietrza



Rys. 3.2. Palenisko półgazowe: 1 – wnętrze pieca, 2 – ruszt, 3 – warstwa paliwa, 4 - dopływ powietrza pierwotnego, 5 – wylot „półgazu”, 6 – doprowadzenie powietrza wtórnego, 7 – zasuwę regulacyjną powietrza, 8 – drzwiczki paleniska

Przeniesienie najwyższej temperatury spalin do komory roboczej pieca uzyskuje się w paleniskach półgazowych (rys.3.2). Zasada ich działania polega na tym, że we właściwym palenisku prowadzi się spalanie niezupełne paliwa przy niedostatecznej ilości powietrza. Otrzymany w ten sposób gaz, tzw. półgeneratorowy, przechodzi do komory roboczej i tu się

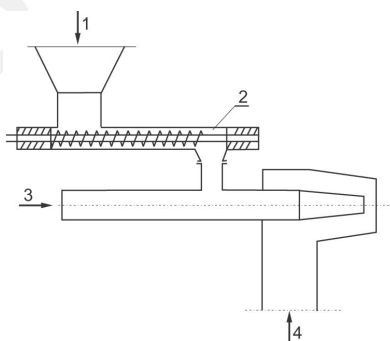
dopala. Dla jego dopalenia wprowadza się do komory dodatkowe powietrze, tzw. wtórne, które zwykle jest też wcześniej podgrzewane do wysokiej temperatury w wymienniku ciepła. W ten sposób w samej komorze roboczej można uzyskać znacznie wyższe niż poprzednio temperatury pracy.

Możliwość osiągnięcia tylko stosunkowo niskich temperatur w przestrzeni roboczej pieca, niska sprawność takich palenisk, brak możliwości regulacji procesu spalania oraz uciążliwość obsługi spowodowały, że obydwa te sposoby opalania pieców ceramicznych zostały już praktycznie całkowicie wyeliminowane z praktyki przemysłowej

Paliwo stałe w postaci kawałkowej może także być spalane wewnątrz objętości wypalanego wsadu. Metoda ta jest stosowana w niektórych piecach szybowych, np. do produkcji wapna palonego, magnezji kaustycznej czy klinkieru dolomitowego oraz w starych konstrukcjach pieców kręgowych i wielokomorowych do wypalania cegły budowlanej i ostatnich gatunków ogniotrwałych wyrobów szamotowych. W pierwszym przypadku do pieca ładowane są przemiennie warstwy wsadu i paliwa lub ich mieszanina. W przypadku drugim paliwo zasypywane jest do pieca w szczeliny między ułożonymi w stopy kształtkami przeznaczonymi do wypalania. Wsad pobiera więc ciepło bezpośrednio od spalanego na nim paliwa.

Również i te sposoby opalania pieców ceramicznych ulegają w chwili obecnej likwidacji i zastępowaniu znacznie wygodniejszym opalaniem paliwami gazowymi i ciekłymi. Dotyczy to zwłaszcza pieców do wypalania wyrobów, gdzie bezpośredni ich kontakt z popiołem paliw był bardzo często powodem znacznej ilości wybraków produkcyjnych (ożuzlenia, wytopy). Sposób ten jest jednak stosowany nadal w piecach szybowych, zwłaszcza wapienniczych, z uwagi na dużą jednorodność wypalenia wsadu oraz bardzo wysoki stopień wykorzystania ciepła.

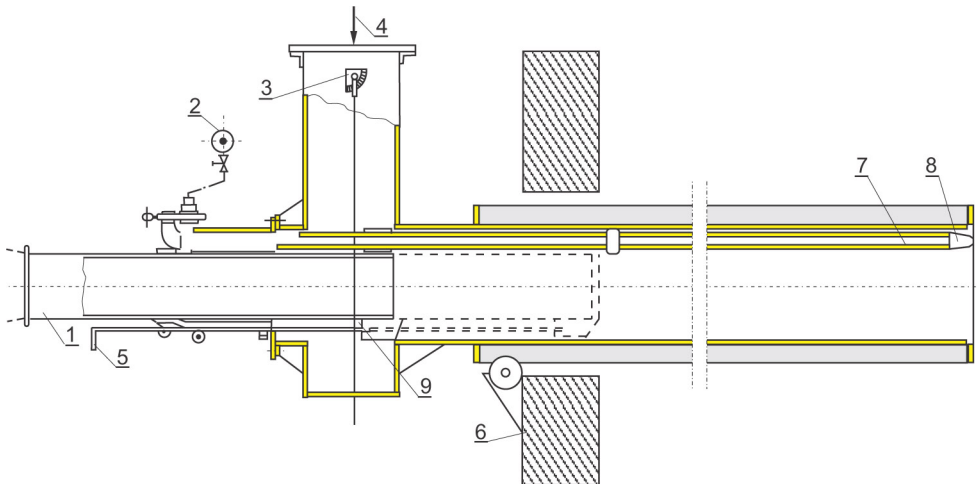
Paleniska pyłowe służą do spalania paliw stałych, najczęściej węgla kamiennego, rozdrobnionych do uziarnienia poniżej 0,2 mm. Zasadniczym ich elementem jest palnik pyłowy, którego zasadę działania przedstawia rysunek 3.3.



Rys. 3.3. Schemat palnika pyłu węglowego: 1 – pył węglowy, 2 – dozator pyłu, 3 – powietrze pierwotne, 4 – powietrze wtórne

Do palnika podawana jest pod ciśnieniem mieszanka pyłu węglowego z powietrzem pierwotnym (20 ÷ 40%), a do jego wylotu reszta potrzebnego powietrza spalania jako powietrze wtórne. Po wymieszaniu obu strug mieszanka pyłu z powietrzem ulega bardzo szybkiemu spalaniu.

W piecach obrotowych palniki pyłowe mają postać długiej lancy stalowej pokrytej ochronnym wyłożeniem ogniotrwałym. Lanca taka wprowadzana jest do pieca i samo spalanie paliwa odbywa się w jego przestrzeni roboczej (rys. 3.4).



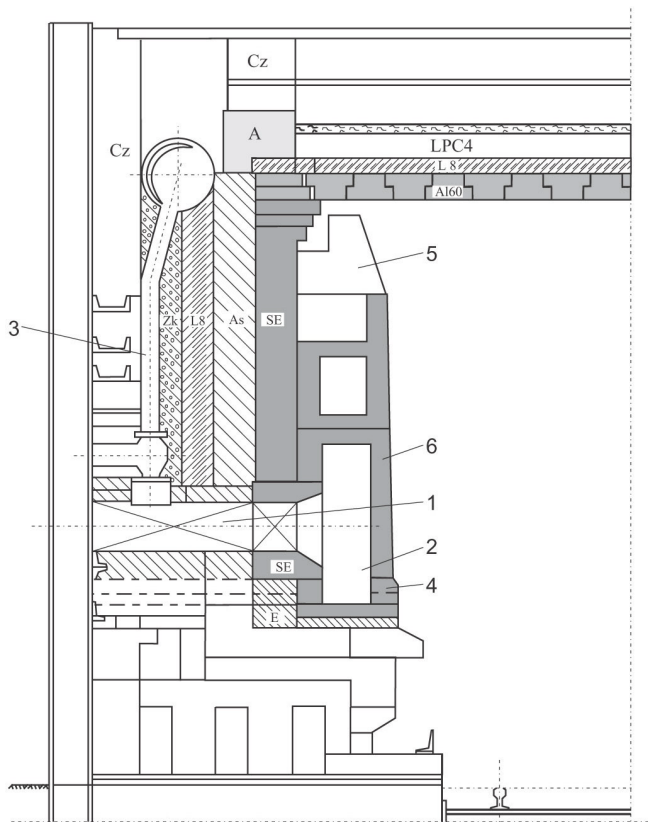
Rys.3.4. Palnik pyłowy De Jonga Coena w piecu obrotowym: 1 – doprowadzenie mieszanki pyłu węglowego z powietrzem pierwotnym, 2 – doprowadzenie oleju, 3 – zasuwę, 4 – doprowadzenie powietrza wtórnego, 5 – regulacja urządzenia mieszającego pył z powietrzem wtórnym, 6 – głowica pieca, 7 – przewód olejowy, 8 – palnik olejowy, 9 – zawór powietrza z otoczenia

Zapalanie palnika odbywa się przy pomocy dodatkowej (pomocniczej) lancy olejowej, usuwanej potem z pieca lub od stosu palącego się drewna. Palnik pomocniczy lub palący się stos mają za zadanie nagrzanie wnętrza pieca do temperatury zapłonu paliwa zasadniczego

Prędkość rozprzestrzeniania się płomienia w mieszance pyłu z powietrzem wynosi do 12 m/s, stąd aby wykluczyć możliwość przeskoku płomienia do wnętrza palnika szybkość wypływu mieszanki z palnika musi być powyżej 15 m/s. W urządzeniach piecowych, w których wymagany jest płomień długi (piece obrotowe), szybkości wypływu mieszanki są większe i wynoszą 25 ÷ 70 m/s.

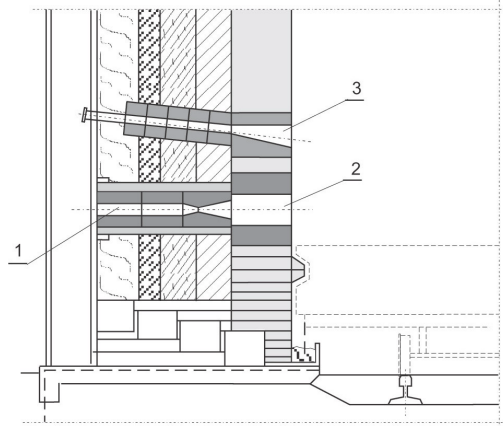
Opalanie paliwem pyłowym przez wiele lat stosowano tylko w energetyce. Wzrost cen paliw ciekłych i gazowych spowodował, że wprowadzono je również w przemyśle ceramicznym. W chwili obecnej stosuje się je w piecach obrotowych, głównie do wypalania klinkieru cementowego, w piecach do wypalania ceramiki budowlanej oraz wyrobów ceramicznych nie szkliwionych.

Paleniska gazowe składają się z odpowiedniej wielkości komory, w której spala się paliwo gazowe, wprowadzone i przygotowane do spalania przez palnik. W komorach tych, tzw. palnikowych, umieszczonych zazwyczaj w obrębie obmurza, następuje całkowite spalanie paliwa i do przestrzeni roboczej pieca kierowane są tylko gorące spaliny. Ścianki tych komór, oddzielające je od wnętrza pieca, stanowią tzw. przewał skierowujący strumień spalin pod sklepienie komory (piece o płomieniu zstępującym) i wykonane są jako ażurowe (rys. 3.5), z tak rozmieszczonymi otworami, aby równomiernie rozprzewadzić spaliny do wnętrza pieca, a więc uzyskać równomierny rozkład temperatur w jego przekroju.



Rys. 3.5. Przekrój strefy ogniowej pieca tunelowego do wypalania rur kamionkowych: 1 – kanał palnikowy, 2 – komora palnikowa, 3 – doprowadzenie powietrza pierwotnego, 4 – dolne otwory wylotowe w przewale, – główny wylot spalin, 6 – Ścianka przewałowa

Niekiedy rezygnuje się z budowania takich oddzielnych komór palnikowych. Wówczas ich funkcje przejmują kształtki palnikowe, których kanał skierowany do wnętrza pieca zapewnia przestrzeń dla spalania się paliwa (rys. 3.6). Rozwiązanie takie stosuje się dla palników dających płomień krótki.



Rys.3.6. Przekrój strefy ogniowej pieca tunelowego: 1 – kanał palnikowy, 2 – przestrzeń spalania paliwa, 3 – kanał wziernikowy

Zadaniem samego palnika jest podawanie, regulacja oraz wzajemne wymieszanie gazu i powietrza. O jakości i szybkości spalania oraz długości płomienia decyduje wiele czynników, z których najważniejsze to

- skład chemiczny paliwa,
- udział powietrza w mieszance
- temperatura podgrzania gazu i powietrza,
- ciśnienie i szybkość wypływu z palnika,
- sposób mieszania gazu z powietrzem

Zróżnicowanie zawartości składników palnych w różnych paliwach (różne ich szybkości spalania) oraz technologiczne wymagania odnośnie temperatury i atmosfery we wnętrzu pieców powodują mnogość konstrukcji palników dla paliw gazowych.

Ze względu na sposób i warunki doprowadzenia gazu i powietrza oraz miejsce i stopień ich zmieszania, palniki dla gazów można podzielić na dwa typy:

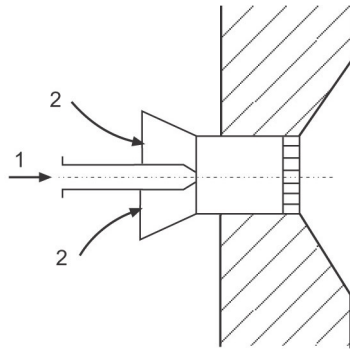
- 1) iniekcyjne (dyfuzyjne),
- 2) podmuchowe,

a ze względu na ciśnienie podawanego gazu na:

- niskociśnieniowe <5 kPa,
- średnociśnieniowe 10 ÷ 300 kPa
- wysokociśnieniowe >300 kPa.

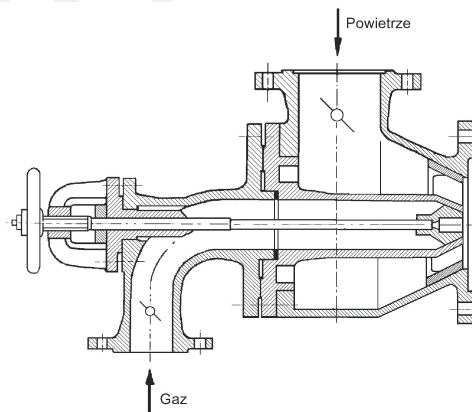
Schemat działania palnika iniekcyjnego przedstawia rysunek 3.7. Wypływający z dyszy gaz zasysa powietrze do palnika. Mieszanie gazu z powietrzem następuje dopiero za

wylotem palnika, a proces mieszania determinowany jest procesem dyfuzji – stąd druga nazwa tych palników. Palniki te dają więc płomień długi. Istnieją również rozwiązania, w których medium zasysającym jest powietrze. Palniki takie nadają się do pracy przy stałym obciążeniu cieplnym, bowiem każda zmiana natężenia przepływu powoduje zmiany stosunku gaz – powietrze. Wadą ich jest też duża wrażliwość na nadciśnienie w komorze roboczej pieca, mogące ograniczyć ilość zasysanego powietrza i w rezultacie zgaśnięcie palnika.



Rys. 3.7. Schemat palnika iniekcyjnego: 1 – gaz, 2 – powietrze otoczenia

W palnikach podmuchowych gaz oraz powietrze podawane są oddzielnie pod określonym ciśnieniem, a ich zmieszanie może następować za wylotem palnika (spalanie wówczas jest przewlekłe), względnie częściowo lub całkowicie już w samym palniku, w komorze mieszania (rys. 3.8). Stopień zmieszania zależy od długości komory mieszania oraz rodzaju i ilości elementów zawierujących strumień powietrza.



Rys. 3.8. Palnik podmuchowy

Częściej stosowane są palniki podmuchowe, umożliwiające oddzielną regulację wydatku gazu i powietrza oraz regulację długości płomienia i atmosfery w piecu. Dobrze działający palnik musi zapewnić płynną regulację wydajności przynajmniej w zakresie $0,3 \div 1,0$ wydajności znamionowej.

Z uwagi na możliwość łatwej i dokładnej regulacji palników gazowych, możliwość spalania przy minimalnym tylko nadmiarze powietrza, brak popiołu oraz możliwość łatwego transportu na znaczne odległości, opalanie gazem jest najczęściej stosowanym sposobem dostarczania ciepła w piecach ceramicznych wszystkich rodzajów.

Paliwa ciekłe spalają się w stanie gazowym. Pary paliwa zmieszane z powietrzem spalają się, dostarczając ciepła na odparowanie następnych porcji mieszanki wypływającej z palnika i proces trwa dalej.

Palniki dla paliw ciekłych (olej opałowy, mazut) zasadniczo nie różnią się od palników gazowych. Ich zadaniem jest rozpylenie paliwa ciekłego do postaci mgły i jak najlepsze wymieszanie go z powietrzem. Sposoby rozpylania paliw ciekłych mogą być różne:

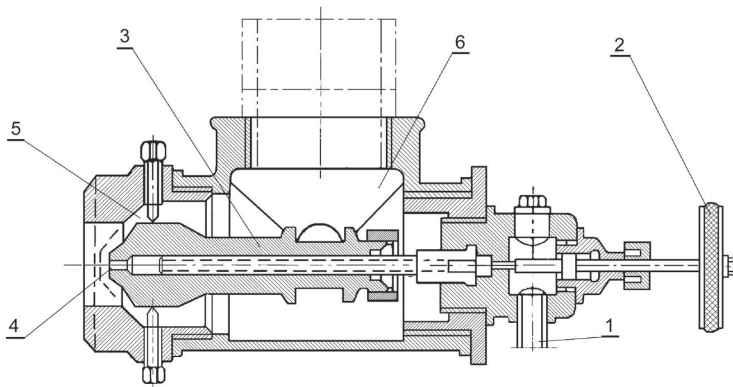
- hydrodynamiczne – rozpylenie paliwa podawanego pod ciśnieniem $2 \div 3$ MPa następuje przy jego wypływie z dużą prędkością ($50 \div 70$ m/s) przez dyszę o średnicy $0,5 \div 2,5$ mm. Ponieważ regulacja wydajności tych palników wpływa mocno na efekt rozpylania, mogą one dobrze pracować w warunkach stałego obciążenia cieplnego – np. w piecach obrotowych dla cementu,
- gazodynamiczne – czynnikiem rozpylającym paliwo jest strumień wypływającego pod ciśnieniem powietrza,
- mechaniczne.

Najczęściej stosowane jest rozpylenie gazodynamiczne przy pomocy powietrza. W zależności od ciśnienia powietrza rozpylającego wyróżnia się palniki:

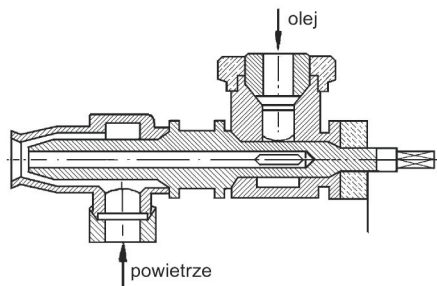
- niskociśnieniowe (rys. 3.9) – ciśnienie do 10 kPa,
- wysokociśnieniowe (rys. 3.10) – ciśnienie >50 kPa.

Palniki wysokociśnieniowe dają dłuższy płomień i wymagają więcej powietrza wtórnego. Powietrze podawane do rozpylania stanowi ok. 30% powietrza potrzebnego do spalania. Szybkość wypływu mieszanki paliwowo-powietrznej z palnika może wynosić do 80 m/s. Palniki dla paliw ciekłych wyposażone są zwykle w elektryczne zapalarki i są w pełni zautomatyzowane.

Paliwo ciekłe podawane do palników musi mieć odpowiednio niską lepkość (3°E dla oleju opałowego i $6 \div 8^{\circ}\text{E}$ dla mazutu). Przy lepkościach wyższych pogarsza się stopień rozpylenia, przez co spalanie może być niezupełne, wydziela się sadza i obniża temperatura płomienia, a przewody doprowadzające mogą ulegać zatykaniu. Wymaga to często podgrzewania przy pomocy pary wodnej zarówno paliw ciekłych, jak i ich przewodów do temperatury $80 \div 120^{\circ}\text{C}$.



Rys.3.9. Palnik niskiego ciśnienia dla paliw ciekłych: 1 – dopływ paliwa, 2 – pokrętko regulacji ilości paliwa, 3 – dysza, 4 – otwór wypływu, 5 – szczelina wylotowa powietrza, 6 – otwór dopływu powietrza



Rys.3.10. Palnik olejowy dynamiczny wysokiego ciśnienia

Opalanie paliwami ciekłymi stosuje się praktycznie we wszystkich rodzajach pieców dla surowców i wyrobów ceramicznych wymagających wysokich temperatur wypalania.

3.2. Wykorzystanie energii elektrycznej

Energia elektryczna jest najbardziej wygodnym źródłem ciepła w piecach. Otrzymywanie ciepła z energii elektrycznej jest prostsze niż ze spalania paliw. Stosowanie jej zapewnia całkowitą czystość środowiska gazowego przestrzeni roboczej i bardzo dokładną regulację obróbki cieplnej przy możliwości pełnej automatyzacji wypalania. Stosowana jest więc wszędzie tam, gdzie takie warunki muszą być zachowane: w piecach do wypalania dekoracji na porcelanie stołowej, w piecach do wypalania ceramiki technicznej i specjalnej, czułej na skład środowiska gazowego, a także w piecach do wypalania w kontrolowanych atmosferach.

W ceramice najczęściej stosowane są piece z oporowymi elementami grzejnymi. Nagrzewanie łukiem elektrycznym stosuje się w przypadkach syntezy lub topienia niektórych wysokoogniotrwiałych materiałów: węgla krzemu, elektrokorundu, magnezyj topionej lub innych tworzyw kombinowanych. Nagrzewanie indukcyjne stosuje się bardzo rzadko z uwagi na to, że większość tworzyw ceramicznych nie jest przewodnikami. Niekiedy nagrzewanie indukcyjne stosuje się w procesach formowania na gorąco ceramiki tlenkowej, wówczas jednak formy pokrywa się innymi materiałami przewodzącymi.

Grzejnictwo oporowe opiera się na zjawisku wydzielania ciepła przy przepływie prądu elektrycznego przez przewodnik lub półprzewodnik (element grzejny) o określonej oporności. Ilość wydzielonego ciepła wynosi

$$Q=U \cdot I \cdot \tau = \frac{U^2}{R} \tau = I^2 \cdot R \cdot \tau, \quad [\text{J}] \quad (3.32)$$

a moc cieplna elementu:

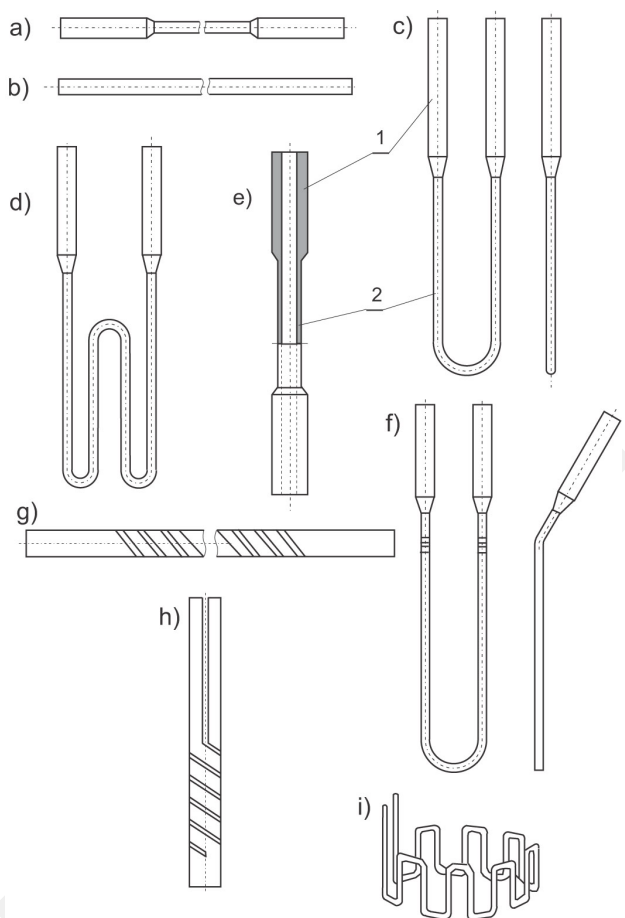
$$P=U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}, \quad [\text{W}] \quad (3.33)$$

gdzie: U - napięcie, [V]
 I - natężenie, [A]
 R - opór elementu, [W]
 τ - czas, [s].

Oporowe elementy grzejne mogą być wykonywane ze specjalnych stopów żelaza z domieszkami Ni, Al, Cr np. Baildonal, Kanthal A, pozwalających na uzyskanie temperatur wypalania do 1000 ÷ 1350°C albo też z materiałów ceramicznych wykonanych metodami metalurgii proszków, przy których temperatury wypalania mogą być znacznie wyższe.

Metaliczne elementy grzejne wykonane są najczęściej w postaci skrętek z drutu lub taśm. Elementy ceramiczne to formowane kształtki w postaci prętów, rur lub pętli (rys. 3.11). Elementy ceramiczne najczęściej wykonywane są z węgla krzemu (sylity – temp. pracy do 1500°C), dwukrzemku molibdenu MoSi₂ (Mosilit, Superkanthal – 1700 ÷ 1900°C), dwutlenku cyrkonu ZrO₂ (2000°C) względnie z węgla elektrodowego (3000°C lub 2200°C w próżni). Trwałość oporowych elementów grzejnych mocno zależy od wielkości obciążenia termicznego (prądowego) oraz składu gazowego środowiska przestrzeni roboczej.

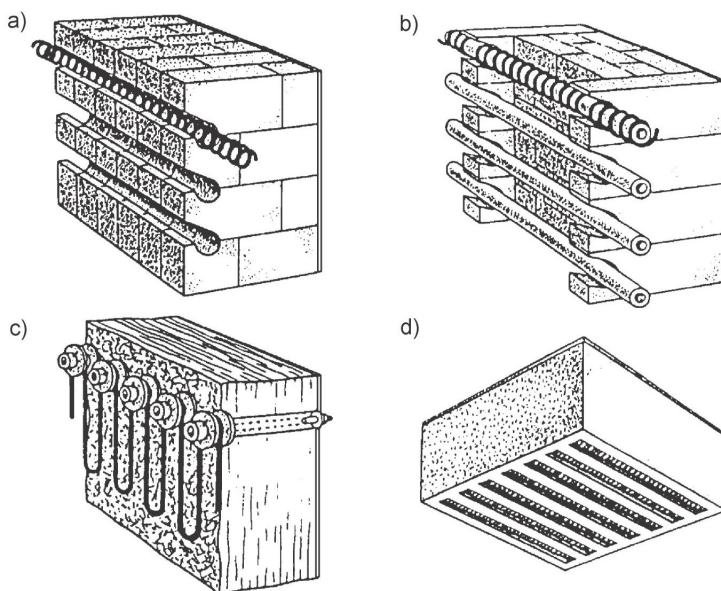
Metaliczne elementy grzejne w wysokich temperaturach tracą sprężystość i dlatego muszą być podparte na całej długości. Skrętki grzejne nasuwa się więc na ogniotrwałe pręty lub rurki ceramiczne, względnie umieszcza w specjalnych rowkach wykonanych w ścianach



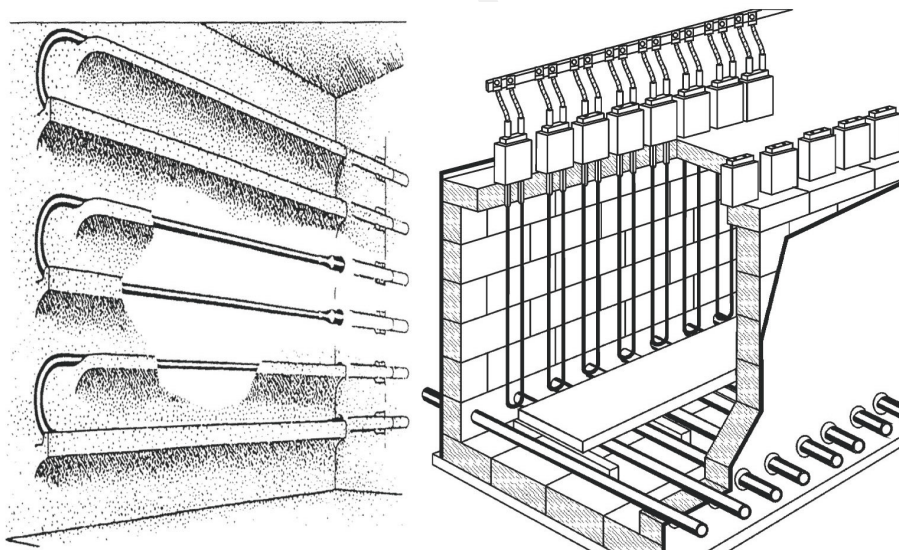
Rys.3.11. Typowe rodzaje ceramicznych oporowych elementów grzejnych: a) pręt sillitowy; b) pręt (rura) crusillitowa; c) i f) pręt U-Kanthal Super; d) pret 2U-Kanthal Super; e) pręt Cesivid; g) i h) nacinane pręty (rury) crusillitowe; i) kształtki kołowo-spiralne

komory roboczej pieca (rys. 3.12). Materiały kontaktujące się z tymi elementami powinny być dobrymi izolatorami elektrycznymi. Najczęściej są to tworzywa glinokrzemianowe lub korundowe o możliwie małej zawartości Fe_2O_3 .

Ceramiczne elementy grzejne rzadko umieszcza się na podpórkach. Najczęściej są one mocowane w sposób uniemożliwiający kontakt z wymurówką (rys. 3.13). Jest to podyktowane możliwością ich reakcji z wyłożeniem ogniotrwałym w wysokich temperaturach pracy. Ceramiczne elementy grzejne źle znoszą zmiany temperatury, stąd stosowane są częściej w piecach o pracy ciągłej.

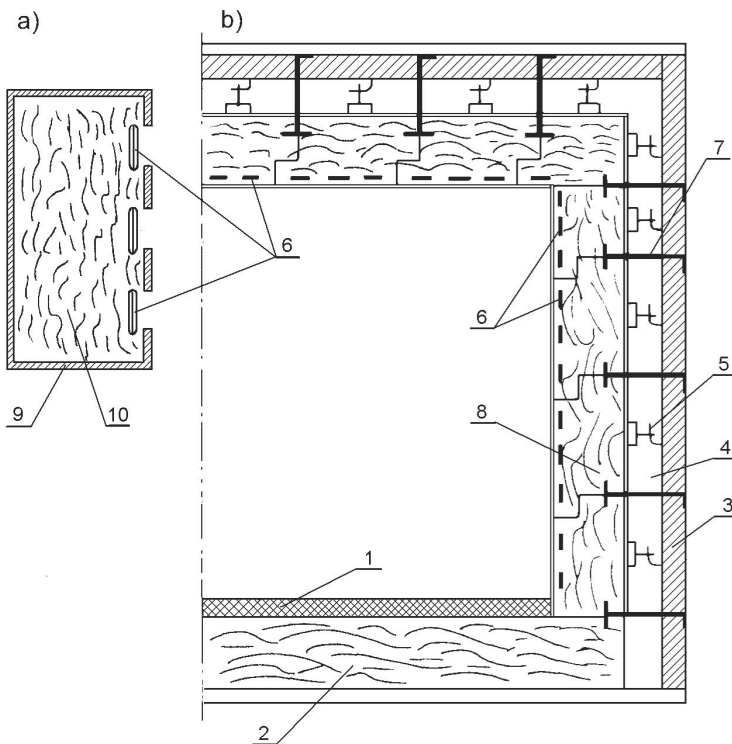


Rys. 3.12. Oporowe metaliczne elementy grzejne – przykłady mocowań: a) i b) obmurza murowane; c i d) obmurza z materiałów włóknistych



Rys. 3.1.3. Oporowe ceramiczne elementy grzejne – przykłady mocowań

Jednym z nowszych rozwiązań w przemysłowym grzejnictwie elektrycznym są tzw. panelowe moduły grzejne opracowane i wdrożone przez amerykańską firmę Lindberg Heavy-Duty. Moduły te, to formowane metodą próżniową bloki z materiałów włóknistych, których integralną częścią jest umieszczony wewnątrz element grzejny z wyprowadzeniami do połączenia z instalacją elektryczną (rys. 3.12d i 3.14). Budowa wyłożenia pieca, stanowiącego jednocześnie ściany grzejne, polega na ułożeniu takich modułów i wykonaniu połączeń. Schemat takiej konstrukcji przedstawia rysunek 3.14b. Moduły te, znane pod nazwą Meanderthal lub Fibrothal, produkowane są przez firmę Kanthal GmbH i stosowane są do budowy pieców kołpakowych, tunelowych, pieców emalierskich i do obróbki cieplnej szkła, w których temperatura pracy nie przekracza 1100°C.



Rys.3.14. Moduły grzejne Fibrothal: a) schemat modułu; b) sposób wykonania obmury.

1 – ceramiczna płyta trzonowa, 2 – bloki izolacyjne Fibrothal, 3 – izolacja obudowy pieca, 4 – przestrzeń (chłodzona konwekcyjnie) dla wykonania połączeń elektrycznych, 5 – połączenie elektryczne modułów, 6 – oporowe elementy grzejne, 7 – haki nikrothalowe do mocowania modułów, 8 – moduł grzejny Fibrothal, 9 – zewnętrzna, twarda część modułu, 10 – wypełnienie włóknami ogniotrwałymi

Dobór i obliczenia oporowych elementów grzejnych dla konkretnych jednostek piecowych przeprowadza się w oparciu o wyliczone zapotrzebowanie ciepła i charakterystykę materiałów lub elementów oporowych, zawartą w katalogach firmowych.

Wielkościami charakterystycznymi metalicznych materiałów oporowych są średnice (druty) lub wymiary poprzeczne (taśmy), rezystancja oraz dopuszczalne temperatury pracy i obciążenia powierzchniowe. Wychodząc z wymaganej mocy cieplnej pieca dobiera się rodzaj i wymiary materiału oporowego, a następnie w oparciu o zalecenia producenta dobiera się sposób i wymiary dla wykonania elementów grzejnych, sposób ich mocowania w piecu, a także rodzaj i sposób zasilania.

Elementy w postaci skrętek z drutu lub taśm podłącza się zwykle bezpośrednio do sieci prądu jedno- lub trójfazowego. Regulację prowadzi się przez przełączanie zasilania trójkąt – gwiazda, rzadziej przy pomocy autotransformatora.

Niemetaliczne elementy grzejne są najczęściej znormalizowanymi kształtkami o ściśle określonych wymiarach części grzejnej i przyłączeniowej. Ich charakterystycznymi wielkościami są ponadto dopuszczalna temperatura pracy, moc pojedynczego elementu, oporność w maksymalnej temperaturze pracy oraz nominalne napięcie zasilania.

Dobór rodzaju elementów odbywa się w zależności od wysokości temperatury pracy, a ich ilość w zależności od zapotrzebowania mocy. Wymiary elementów grzejnych dobiera się na podstawie wielkości komory roboczej (część grzejna) oraz grubości wymurówki (część przyłączeniowa).

Ceramiczne elementy grzejne zasilane są przez regulowane transformatory, bowiem z uwagi na ich bardzo małą oporność elektryczną płyną przez nie duże prądy, rzędu nawet kilkuset amperów, przy napięciach od kilku do kilkudziesięciu woltów.

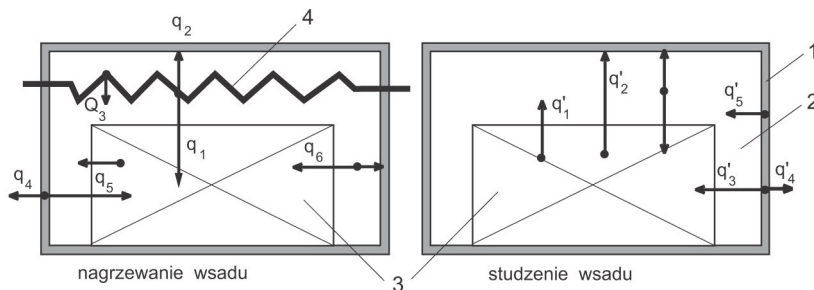
3.3. Wymiana ciepła w piecach

Piec, w którym zachodzi obróbka cieplna materiałów, jest urządzeniem technologicznym, będącym otwartym układem termodynamicznym. Układem termodynamicznym dlatego, że zachodzą w nim wzajemne termodynamiczne oddziaływania źródła ciepła, nośnika ciepła oraz obrabianego wsadu i obmuruza. Układem otwartym dlatego, że zawsze zachodzi wymiana ciepła z otoczeniem pieca.

Tym wzajemnym oddziaływaniami, a ściślej – zjawiskom wymiany ciepła pomiędzy poszczególnymi elementami takiego układu, poświęcono w literaturze technicznej wiele uwagi. Tu przedstawione zostaną tylko podstawowe pojęcia i zasady wymiany ciepła, niezbędne dla zrozumienia zasad działania pieców. Czytelnik pragnący szczegółowo wniknąć w różne aspekty zagadnienia wymiany ciepła ma do dyspozycji obszernie opracowania monograficzne.

Obróbka cieplna wsadu wymaga dostarczenia do niego ciepła. Ciepło to uzyskuje się albo ze spalania paliw albo przez przetworzenie energii elektrycznej. Aby wsad uległ nagraniu ciepło to musi do niego przepłynąć. Pomijamy tu oczywiście możliwości wydzielania ciepła w samym wsadzie, np. wskutek wypalania się domieszek organicznych w nim zawartych lub wskutek reakcji egzotermicznych.

Przepływ taki, zgodnie z II zasadą termodynamiki jest możliwy tylko wówczas, gdy istnieje różnica temperatur między tym wsadem a – ogólnie – jego otoczeniem dostarczającym ciepło. W wymianie ciepła z wsadem biorą udział źródło ciepła, środowisko wnętrza pieca oraz jego obmurze, przy czym przepływ ciepła między tymi elementami może być dwukierunkowy. Schematycznie przedstawia to rysunek 3.15.



Rys.3.15. Schemat wymiany ciepła w piecu: q_1 – źródło ciepła → wsad, q_2 – źródło ciepła → obmurze pieca, q_3 – źródło ciepła → wnętrze pieca, q_4 – obmurze → otoczenie, q_5 – obmurze → wsad, q_6 – wnętrze pieca → wsad, q'_1 – wsad → wnętrze pieca, q'_2 – wsad → obmurze, q'_3 – obmurze → wsad, q'_4 – obmurze → otoczenie, q'_5 – obmurze → wnętrze pieca, 1 – obmurze, 2 – wnętrze pieca (środowisko gazowe), 3 – wsad, 4 – źródło ciepła

Źródłem ciepła w komorze roboczej pieca są najczęściej gorące spaliny, dopalające się w tej komorze, tworzące płomień. Przekazują one swe ciepło wsadowi i obmurzu w komorze roboczej, a w dalszych częściach instalacji piecowej tylko obmurzu na drodze do komina. Znajduje to wyraz w stopniowym spadku ich temperatury. Ciepło przekazane obmurzu w części jest w nim przewodzone na zewnątrz i nieużytecznie tracone do otoczenia, w części natomiast oddawane jest z powrotem do środowiska gazowego komory roboczej i wsadu. Podobna jakościowo sytuacja występuje również w piecach ogrzewanych elektrycznie.

Wymiana ciepła może się odbywać trzema sposobami, przez

- 1) przewodzenie,
- 2) konwekcję
- 3) promieniowanie.

Przewodzenie ciepła jest zjawiskiem wymiany ciepła w obrębie jakiegoś jednego układu materialnego pomiędzy jego elementami lub między takimi układami będącymi ze sobą w kontakcie. Przepływ ciepła może więc występować np. wzdłuż pojedynczej kształtki

nagrzanej jednostronnie, jak i pomiędzy takimi kształtkami ułożonymi w stos ustawki, a także kształtkami czy warstwami obmurza pieca.

Konwekcja to wymiana ciepła między zmieniającymi swe wzajemne położenie elementami płynu (gazu). Jest więc przemieszczaniem się energii wraz z elementami ośrodka. Cząstki płynu (gazu) o różnej temperaturze mają różną gęstość, są zatem przemieszczane wskutek działania sił grawitacyjnych. Jest to konwekcja naturalna. Gdy ruch cząstek płynu wymuszony jest np. ciągiem czy wentylatorem nadmuchowym, to mówimy o konwekcji wymuszonej. Gdyby nie było ruchu ośrodka wówczas wymiana ciepła mogłaby zachodzić tylko przez przewodzenie.

Wymiana ciepła przez konwekcję połączona jest z pobieraniem i oddawaniem ciepła na granicy faz. W piecach mechanizm ruchu ciepła od gazów do ścian i wsadu, w którym bierze udział konwekcja nazywa się wnikaniem ciepła, a ruch ciepła od gazów i materiałów do otoczenia – przenikaniem ciepła.

Energia nagrzanego ośrodka materialnego zamienia się w pewnej części na fale elektromagnetyczne. Fale te napotykając na swej drodze inne ośrodki mogą być przez nie pochłonięte, odbite lub przepuszczone. Ruch ciepła przez promieniowanie polega więc na emisji i absorpcji energii promienistej, którą gazy piecowe, obmurze pieca i wsad przekazują sobie wzajemnie przez warstwę przezroczystego środowiska lub próżnię. Ogólnie, ilość ciepła przepływającego między ciałami jest proporcjonalna do różnicy ich temperatur ($t_2 - t_1$), powierzchni wymiany ciepła (S) i czasu (τ), w którym ta wymiana zachodzi. Można ją opisać zależnością

$$Q = k \cdot S \cdot \tau \cdot (t_2 - t_1), \quad (3.34)$$

przy czym w zależności od mechanizmu przenoszenia ciepła współczynnik „ k ” nosi nazwę współczynnika wymiany ciepła przez konwekcję, przewodzenie lub promieniowanie i ma inną wartość. Określenie wartości tych współczynników jest przedmiotem empirycznych ustaleń, przedstawionych w wielu publikacjach monograficznych.

W praktyce przemysłowej najczęściej mamy do czynienia z jednoczesnym występowaniem wszystkich trzech mechanizmów przenoszenia ciepła. Spaliny oddają swe ciepło wsadowi i obmurzu pieca przez konwekcję i promieniowanie. Nagrzane do wysokiej temperatury ściany i sklepienie pieca wypromieniowują część energii do wnętrza pieca i wsadu, spełniając rolę wtórnych promienników. W samym wsadzie lub jego elementach oraz w obmurzu pieca przepływ ciepła odbywa się przez przewodzenie. Powietrze nadmuchiwane do pieców w celu studzenia wsadu nagrzewa się przez konwekcję i promieniowanie tegoż wsadu i obmurza.

W niektórych piecach poszczególne mechanizmy przenoszenia ciepła nabierają przeważającego znaczenia. W piecach szybowych, gdzie brak jest większych wolnych przestrzeni, przenoszenie ciepła odbywa się głównie przez przewodzenie stykających się ze

sobą brył wsadu. W płomiennych piecach szklarskich, gdzie między powierzchnią kąpieli a sklepieniem istnieje duża przestrzeń, ciepło przekazywane jest wsadowi głównie przez promieniowanie. W piecach muflowych, w których wsad nie styka się ze spalinami, istotnego znaczenia nabiera przewodzenie ciepła przez ścianki mufl, a potem promieniowanie go do wsadu. W oporowych piecach elektrycznych nagrzewanie wsadu odbywa się prawie wyłącznie przez promieniowanie.

Każdy z wymienionych sposobów wymiany ciepła posiada charakterystyczne właściwości. Ilość ciepła oddawanego przez konwekcję można wydatnie zwiększyć zwiększeniem prędkości przepływu spalin. Płomień świecący oddaje zawsze więcej ciepła niż płomień nieświecący. Promieniowanie ciepła staje się głównym sposobem jego przenoszenia w temperaturach powyżej 1000°C i nie zależy już od szybkości przepływu gazów.

3.4. Ruch gazów w piecach

Warunkiem koniecznym prowadzenia procesu wypalania wsadu w piecach jest stałe dostarczanie do niego ciepła. Ciepło to dostarczane jest wraz z gorącymi spalinami. Jednocześnie spaliny, które oddały już swe ciepło wsadowi, a więc spaliny o obniżonej temperaturze, muszą być usunięte, aby zrobić miejsce dla nowych porcji spalin gorących. Tak więc w piecu musi być zapewniony ciągły ruch gazów, warunkujący osiągnięcie przez wsad odpowiednio wysokich temperatur. Jak już wspomniano wcześniej, ruch gazów w piecu może być naturalny lub wymuszony. Ruch naturalny zachodzi pod wpływem różnicy ciężarów właściwych gazów w różnych miejscach instalacji piecowej, wywołanej różnicami ich temperatury. Gazy przy ogrzewaniu zwiększają swoją objętość zgodnie z zależnością

$$V_t = V_o (1 + \beta \cdot t), \quad [\text{m}^3] \quad (3.35)$$

gdzie:

V_o i V_t - objętość gazu odpowiednio w temperaturze 0°C i w temperaturze t °C, [m^3]
 $\beta=1/273=0,00366$ - współczynnik rozszerzalności cieplnej gazów, [$^{\circ}\text{C}^{-1}$].

Zależność ta wskazuje, że przy ogrzewaniu gazu objętość jego ulega podwojeniu co każde 273°C.

Objętość gazu zmienia się także przy zmianie jego ciśnienia. W praktyce zmiany ciśnienia gazów w piecach są niewielkie i ich wpływ na zmiany objętości można w obliczeniach pieców pominąć.

Wzrostowi objętości ogrzewanych gazów musi towarzyszyć zmniejszanie się ich ciężaru właściwego, bowiem ich masa nie ulega zmianie. Tak więc ciężar właściwy gazu ogrzanego do temperatury t wyniesie

$$\gamma_t = \frac{\gamma_o}{1 + \beta \cdot t} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.36)$$

gdzie:

γ_o i γ_t - ciężary właściwe gazu w temperaturze odpowiednio 0°C i $t^\circ\text{C}$.

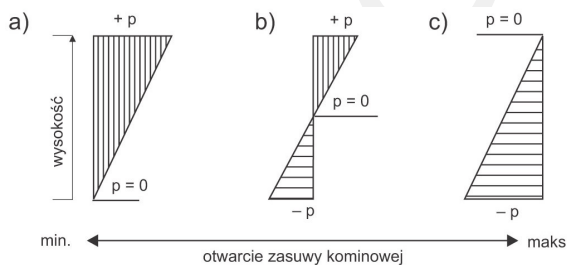
W przestrzeni piecowej gazy o wyższej temperaturze, a więc lżejsze, będą wznosić się do góry. Jest to naturalny ruch gazów. Siła wyporu podnosząca je do góry określona jest zależnością:

$$p_{\text{wyp}} = H \cdot (\gamma_o - \gamma_t) \quad (3.37)$$

gdzie:

H - wysokość słupa gazu lżejszego, [mm].

To naturalne unoszenie się gazów lżejszych powoduje, że w komorach roboczych i kanałach pieców (zamkniętych od góry) będą występowały większe ciśnienia w górnych ich częściach, pod sklepieniem, niż w częściach dolnych na poziomie trzonów. Różnica ciśnień odpowiadać będzie wartości tego wyporu (rys. 3.16).



Rys.3.16. Rozkład ciśnień w pionowym przekroju komory pieca a) i b) i c) opis w tekście na s. 55

W przypadku gdy zbiornik gazu jest od góry otwarty, siła wyporu będzie powodować ciągle podnoszenie się słupa cieplejszych gazów do góry i wyrzucanie ich do atmosfery. Na tej zasadzie działają kominy. Przemieszczający się w nich do góry słup lżejszych spalin powoduje powstanie w dolnej części kominia podciśnienia zwanego ciągiem kominowym, wyciągającego gazy z kanałów i komór roboczych instalacji piecowej. Wielkość tego ciągu zależy od wysokości kominia H i wynosi

Wielkość tego ciągu zależy od wysokości kominia H i wynosi:

$$p = H \cdot g (\gamma_p - \gamma_s), \text{ Pa} \quad (3.38)$$

gdzie:

γ_s i γ_p - odpowiednio ciężar właściwy spalin w kominie i powietrza otoczenia.
g - przyspieszenie ziemskie, m/s^2

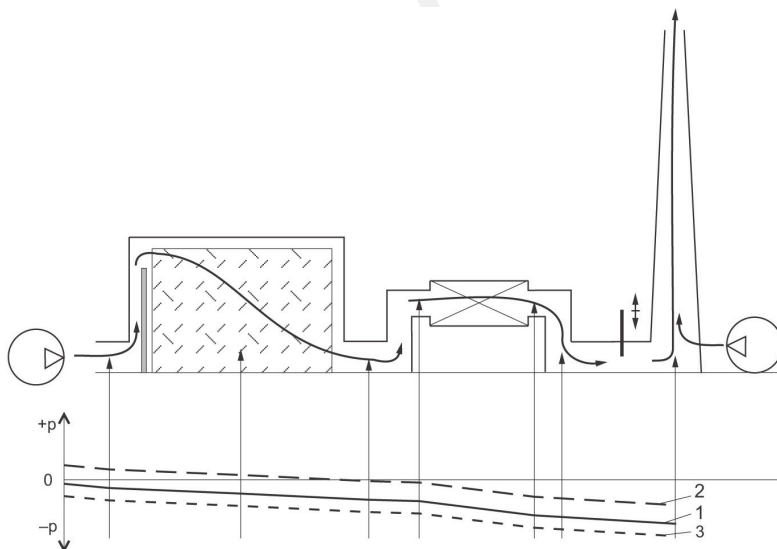
Dla warunków;

$T=0^\circ\text{C}$ i $p=760 \text{ mm Hg}$, $\gamma_p=1,285 \div 1,293 \text{ kg/m}^3$, a $\gamma_s=1,32 \div 1,34 \text{ kg/m}^3$

Ruch wymuszony gazów powstaje pod wpływem bodźców zewnętrznych, powodujących różnice ciśnień między początkiem (palenisko) a końcem (wylot kominu) instalacji piecowej. Przyczynami wymuszającymi ruch gazów może być energia kinetyczna gazów wychodzących z palników, wentylatorów nadmuchowych lub inżektorów oraz działanie ssące wentylatorów odciągowych – ekshaustorów. Ruch gazów odbywa się wtedy przy znacznych prędkościach, a różnice ciśnień spowodowane różnicami ciężarów właściwych gazów można w obliczeniach pominąć z uwagi na niewielkie wtedy ich wartości.

W instalacji piecowej gazy zawsze przemieszczają się z miejsc o ciśnieniu wyższym do miejsc o ciśnieniu niższym. Ciśnienie statyczne, czyli różnica między ciśnieniem gazów w piecu a ciśnieniem otaczającego powietrza może mieć wartość dodatnią – wtedy mówimy o nadciśnieniu, lub ujemną – wtedy nazywamy ją podciśnieniem lub ciągiem. W instalacji piecowej, na drodze od paleniska do kominu, ciśnienie to nie jest jednakowe. Najwyższe podciśnienie występuje u wlotu kanału spalinowego do kominu.

We wcześniejszych częściach instalacji piecowej jest ono coraz mniejsze, a niekiedy może nawet przechodzić w nadciśnienie. Przyczyną strat ciśnienia na drodze przepływu gazów w instalacji piecowej są tzw. opory przepływu, spowodowane tarciem gazów o ścianki kanałów, zmianami kształtu i wymiarów komór roboczych oraz kanałów gazowych, a także przepływem gazów w kierunku przeciwnym do naturalnego wyporu. Straty te schematycznie przedstawia rysunek 3.17. Wielkość tych strat oblicza się na podstawie założeń teoretycznych i wyników eksperymentalnych.



Rys.3.17. Schemat strat ciśnienia na drodze przepływu gazów w instalacji piecowej: 1 – ciąg kominowy, 2 – ciąg kominowy + nadmuch, 3 – ciąg kominowy + ekshaustor

Prawidłowo zaprojektowane kominy i urządzenia do wymuszania ruchu spalin muszą zapewnić ciąg wystarczający do pokonania oporów przepływu w instalacji piecowej, wraz z pewną rezerwą (20 ÷ 40%) konieczną z uwagi na możliwości różnych zaburzeń podczas eksploatacji pieców (np. zasysanie tzw. fałszywego powietrza przez nieszczelności obmurza i konieczność odprowadzenia przez komin większej ilości gazów niż wynika to z bilansu materiałowego).

W oparciu o wielkość strat ciśnienia, związanych z pokonywaniem oporów przepływu, wylicza się niezbędną wysokość komina H lub dobiera wydajność urządzenia do wytwarzania ciągu sztucznego.

Wielkość i rozkład ciśnień w instalacji piecowej ma duży wpływ na warunki nagrzewania wsadu, sprawność i wydajność pieców. Obmurza komór roboczych i kanałów spalinowych nie są szczelne. Występują w nich także różne otwory jak okna wsadowe i odbiorcze, wzierniki itp. Możliwa jest więc wymiana gazów z otoczeniem.

Wysoka temperatura w komorze roboczej pieców jest przyczyną zróżnicowania wartości ciśnień w zależności od wysokości nad trzonem pieca, tak jak to przedstawia rysunek 3.16. Zmiany rozkładu ciśnień w komorze roboczej pieca uzyskuje się przez zmianę wielkości otwarcia zasuwy kominowej.

W przypadku a), przy najmniejszym otwarciu zasuwy, w całej komorze pieca panuje nadciśnienie. Zapewnia ono najbardziej równomierny rozkład temperatury wewnątrz komory, jednakże może występować tzw. wybijanie płomienia przez otwory w obmurzu, co wiąże się z pewnymi stratami ciepła i naraża obmurze na szybsze zużycie. W przypadku b), przy zwiększonym otwarciu zasuwy, na poziomie trzonu występuje podciśnienie i możliwe jest zasysanie do pieca zimnego powietrza otoczenia, a przez to zwiększenie nierównomierności rozkładu temperatur. Możliwości takie pogłębiają się w przypadku c), przy dalszym zwiększaniu ciągu, gdy w całej komorze pieca występuje podciśnienie.

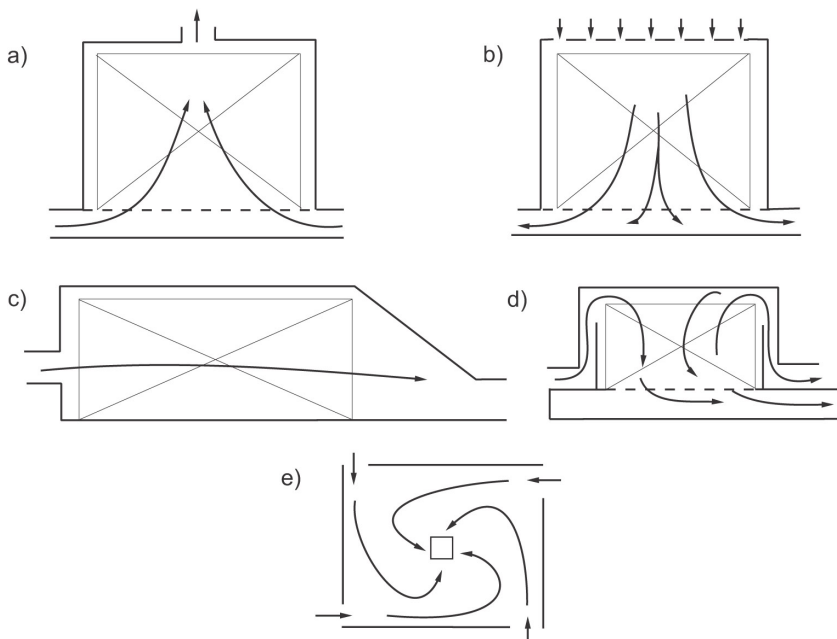
Regulacja ciśnień jest szczególnie ważna w przypadku pieców o dużej wysokości komory roboczej.

Komory robocze i kanały poziome powinny być wypełnione całkowicie gazami. Ich wielkości powinny więc być dobrane odpowiednio do ilości powstających spalin i innych gazów piecowych. W przeciwnym przypadku gorące gazy przepływać będą pod sklepieniem komory czy kanału, a na dnie pozostawać będą prawie nieruchome warstwy gazów zimniejszych. Prowadzi to również do nierównomiernego rozkładu temperatury w piecu. Jest to szczególnie ważne w przypadku gdy wsad leży na dnie komory pieca i nagrzewany jest płomieniem od góry (piece topielne, piece obrotowe). Wsad ten będzie wtedy nie dogrzany, a do kominu odprowadzane będą niewykorzystane, gorące spaliny.

Dla uzyskania równomiernego rozkładu temperatur, a tym samym uzyskania warunków jednakowego wypalenia wsadu, zazwyczaj wymusza się w komorze roboczej pożądaną cyrkulację gazów. Służą do tego odpowiednie lokalizacje palników, elementy

zmieniające kierunki przepływu gazów lub lokalizacje otworów odciągowych spalin. Ogólnie, ze względu na kierunek ruchu płomienia i spalin, piece można zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 3.18 podzielić na pięć typów:

- 1) piece o płomieniu wznoszącym,
- 2) piece o płomieniu zstępującym (opadającym),
- 3) piece o płomieniu poziomym,
- 4) piece o płomieniu wznosząco-opadającym (zwrotnym),
- 5) piece o płomieniu wirującym (cyklonowym).



Rys. 3.18. Warianty ruchu gazów spalinowych w komorze roboczej pieca: a) płomień wznoszący; b) płomień opadający; c) płomień horyzontalny; d) płomień zwrotny; e) płomień cyklonowy

Piece o płomieniu wznoszącym posiadają palniki lub doprowadzenie gorących spalin od dołu, pod ażurowym trzonem. Spaliny unoszą się w górę zgodnie z naturalnym kierunkiem wyporu i odciągane są w górnej części komory pieca. Konstrukcja takiego pieca jest bardzo prosta i cechuje ją brak przewodów spalinowych. W niektórych przypadkach odpada też konieczność budowy komina. Przykładem takiego typu mogą być piece szybkie długopłomienne.

Piece o płomieniu zstępującym stosowane są rzadko. Przeciąganie spalin w dół, przy odpowiednio rozmieszczonych w trzonie otworach odciągowych, zapewnia bardzo równomierne wypalenie wsadu. Wadą tego rozwiązania jest konieczność zapewnienia bardzo dużego ciągu dla pokonania oporów gazów, przemieszczających się w kierunku przeciwnym do naturalnego wyporu. Inną wadą jest też ograniczony wybór konstrukcji palnikowych dla tego typu pieców. Rozwiązanie to stosowane jest w opalanych pyłem węglowym piecach tunelowych do wypalania cegły budowlanej (palniki w stropie pieca).

Piece z horyzontalnym przepływem spalin, opierające się na konstrukcji pieca kasselskiego, są stosunkowo często stosowane w przemyśle ceramicznym. Przykładem mogą być piece obrotowe, wannowe piece szklarskie, piece kręgowo i tunelowe. Wadą tego rozwiązania jest, zwłaszcza przy dużych długościach komór roboczych, możliwość rozwarstwiania się strumienia spalin, przez co górne warstwy wsadu są zwykle lepiej wypalone niż warstwy dolne.

Ogrzewanie płomieniem zwrotnym najczęściej stosowane jest w piecach komorowych o stałym trzonie. Płomień i spaliny skierowywane są ścianką przewalową pod sklepienie, a stąd dopiero ściągane są w dół do otworów odciągowych w trzonie. Dla wyrównania temperatur w komorze, ścianki przewalów posiadają otwory, przez które część spalin dogrzewa wsad w dolnych jego warstwach za przewalem.

Najlepsze wyrównanie temperatur w przestrzeni roboczej pieca osiąga się przy wirowym ruchu płomienia i spalin. Dzięki palnikom o dużej szybkości wypływu płomienia i specjalnemu ich rozmieszczeniu, strumienie spalin intensywnie się mieszają i mocno penetrują wewnątrz ułożonego wsadu, przez co zostaje on bardzo równomiernie wypalony. Rozwiązanie to stosuje się w nowoczesnych piecach komorowych typu kołpakowego i w piecach z wysuwnym trzonem.