

## 8. Kotły parowe

### 8.1. Charakterystyka instalacji kotłowej

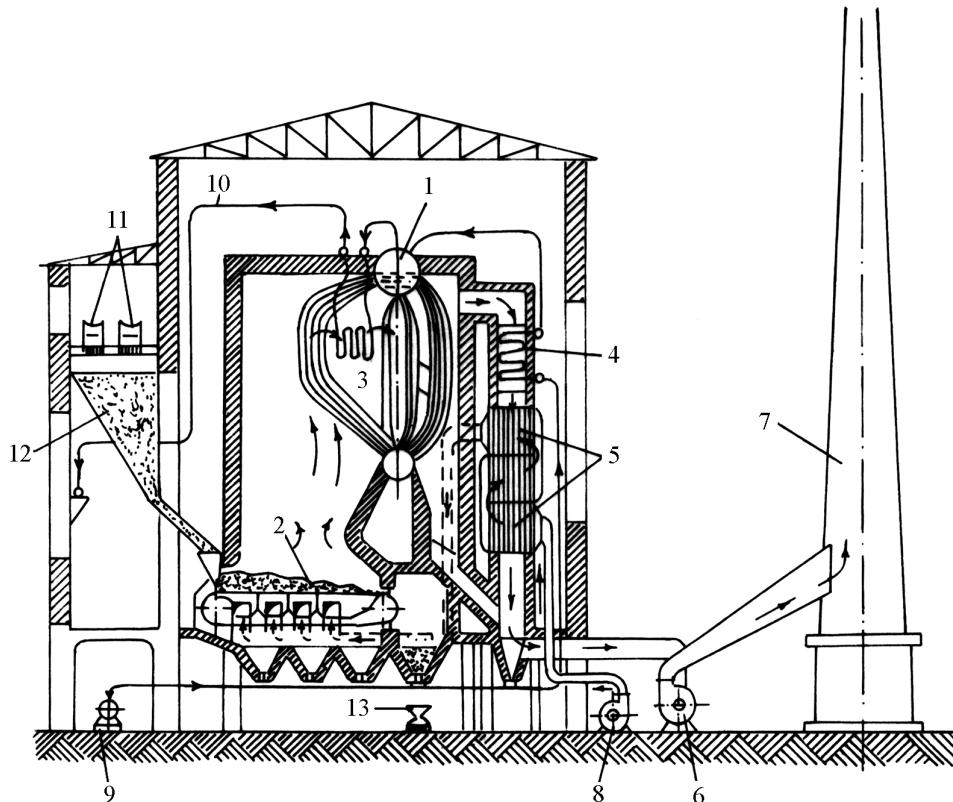
**Instalacja kotłowa** (lub krócej kocioł parowy) jest zespołem urządzeń, które – dzięki przemianie zawartej w paliwie energii chemicznej na energię cieplną gorących spalin – przetwarzają wodę w parę, będącą czynnikiem roboczym turbiny parowej. Proces konwersji energii chemicznej zawartej w paliwie w energię cieplną w parze wodnej opiera się na trzech zjawiskach: spalaniu, przekazywaniu ciepła i parowaniu

*spalanie*  
paliwo → spaliny  
*przekazywanie ciepła*  
spaliny → woda  
*parowanie*  
woda → para wodna

Instalacja kotłowa składa się z **kotła właściwego** i **paleniska** oraz urządzeń **pomocniczych**, do których należą: urządzenia do transportu i przygotowania paliwa, wentylatory podmuchowe i wyciągowe, pompy zasilające, układ odpopielania, aparatura do uzdatniania wody, urządzenia do odpylania, odsiarczania i odazotowania spalin oraz aparatura kontrolno-pomiarowa. Kocioł parowy jest zasilany paliwem, powietrzem i wodą.

Budowa i działanie instalacji kotłowej zilustrowano na przykładzie wodnorurkowego kotła rusztowego opalanego węglem (rys. 8.1) [9]. Kocioł właściwy składa się z walczaka (1) z układem rur parownika (opłomek), przegrzewacza pary (3) i podgrzewacza wody (4). Węgiel z zasobnika (12) spada na ruchomy ruszt paleniska (2). Powietrze do spalania jest tłoczone wentylatorem (8) przez podgrzewacz powietrza (5) pod ruszt. Żużel spada z rusztu do leja żużlowego, skąd jest usuwany za pomocą wózków (13). Spaliny po wylocie z komory spalania omywają pierwszy pęczek rur, a następnie przegrzewacz pary (3) oraz drugi pęczek rur. Dalej spaliny przepływają między wężownicami podgrzewacza wody (4) oraz przez podgrzewacz

powietrza (5), a następnie są podawane wentylatorem wyciągowym (6) do komina (7). Woda jest tłoczona pompą (9) przez podgrzewacz wody (4) do walczaka górnego (1). Oddzielona od wody w walczaku (1) para zostaje skierowana do przegrzewacza pary (3), a stamtąd jest odprowadzana z kotła rurociągiem parowym (10).



Rys. 8.1. Instalacja kotłowa: 1 – walczak, 2 – ruszt, 3 – przegrzewacz pary, 4 – podgrzewacz wody, 5 – podgrzewacz powietrza, 6 – wentylator spalin, 7 – kominek, 8 – wentylator powietrza, 9 – pompa wody, 10 – rurociąg parowy, 11 – wózki z węglem, 12 – zasobnik węgla, 13 – wózek z żużlem [9]

Do pełnego scharakteryzowania działania kotła parowego potrzeba wielu parametrów [5], [8], wśród których najważniejszymi wielkościami są:

- wydajność kotła (strumień pary, kg/s),
- ciśnienie i temperatura wytwarzanej pary, Pa, K,
- pole powierzchni ogrzewalnej kotła, m<sup>2</sup>,
- natężenie cieplne powierzchni ogrzewalnej, W/m<sup>2</sup>,

- sprawność kotła ( $\eta$ ).

**Wydajność kotła** oznacza wytwarzany w kotle strumień masowy pary wodnej o określonych parametrach (ciśnienie, temperatura). Wydajność kotła parowego pracującego w bloku energetycznym kocioł–turbina–generator jest wielkością charakterystyczną dla określonej mocy elektrycznej bloku (tab. 8.1 w p. 8.3, s. 101).

**Ciśnienie** wytwarzanej w kotle pary wodnej zależy od rodzaju kotła i wynosi od 0,05 MPa (małe kotły centralnego ogrzewania) do 26 MPa (kotły wysokoprężne). Uzyskiwana obecnie temperatura pary sięga 600 °C, a dalsze jej zwiększenie jest ograniczone wytrzymałością stali, z której są wykonane rury parownika.

W kotle właściwym przepływają woda i para, jego powierzchnia zewnętrzna natomiast, omywana przez gorące spaliny, stanowi **powierzchnię ogrzewalną kotła**.

**Natężeniem cieplnym** powierzchni ogrzewalnej nazywa się strumień ciepła przenikający 1 m<sup>2</sup> powierzchni ogrzewalnej kotła; zawiera się ono w zakresie od 10 do 300 kW/m<sup>2</sup>.

**Sprawność kotła** jest definiowana jako stosunek

$$\eta = \frac{\text{strumień ciepła przekazany wodzie}}{\text{strumień energii dostarczony w paliwie}}.$$

Sprawność zależy od użytego paliwa. W przypadku kotłów węglowych ważna jest ich wydajność:

$\eta = 0,5\text{--}0,7$  – małe kotły – małej wydajności

$\eta = 0,7\text{--}0,8$  – średnie kotły – średniej wydajności,

$\eta = 0,8\text{--}0,9$  – duże kotły – dużej wydajności.

## 8.2. Ważniejsze typy kotłów

Konstrukcje kotłowe zależą przede wszystkim od ich przeznaczenia oraz od bardzo zróżnicowanych rozmiarów kotłów. Do najważniejszych użytkowników kotłów parowych należą: energetyka, przemysł, transport i gospodarka komunalna, dużą grupę stanowią indywidualni użytkownicy.

1. Ze względu na przeznaczenie rozróżnia się kotły na potrzeby:

- ogrzewania,
- przemysłu,
- ciepłowni i elektrociepłowni,
- dużych elektrowni zawodowych.

2. Podstawą podziału konstrukcji kotłowych może także być rodzaj paleniska:

- kotły rusztowe,
- kotły komorowe,
- kotły fluidalne.

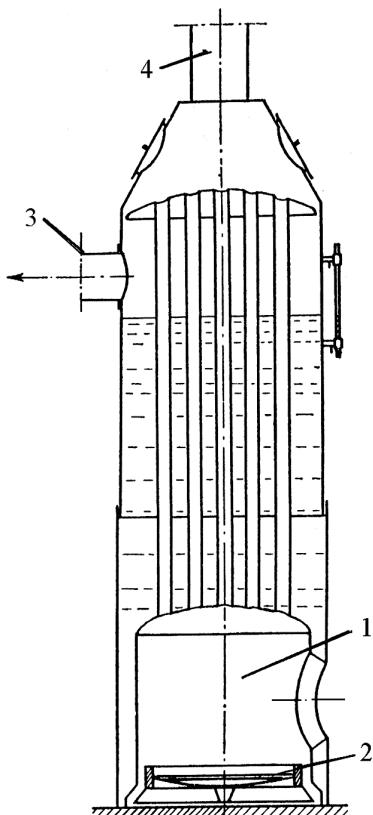
3. Zależnie od rodzaju obiegu wody w kotle rozróżnia się najogólniej:
  - kotły z naturalnym obiegiem wody wywołanym różnicą gęstości wody,
  - kotły z wymuszonym obiegiem wody przez pompę.
4. Ze względu na sposób odprowadzania żużla:
  - z suchym odprowadzaniem żużla,
  - z mokrym odprowadzaniem żużla.

### 8.2.1. Kotły o małej wydajności

#### Kotły pionowe

Kotły opalane węglem o małej wydajności (do 1,4 kg/s) są często budowane jako kotły pionowe. Na rysunku 8.2 ukazano przykład takiego typu kotła o ciśnieniu pary do 1,0 MPa i wydajności w zakresie 0,02–0,14 kg/s (70–500 kg/h) [8]. Kocioł składa się z płaszcza, gładkiej **płomienicy** i **płomieniówek** (płomienówka to rura, przez którą przepływają spaliny, a na zewnątrz jest mydana woda) zawalczowanych w dnach.

Zaletą kotłów pionowych jest prosta budowa, wadą – mała sprawność (około 50%) oraz uciążliwość ręcznego narzucania paliwa.



#### Kotły płomienicowe

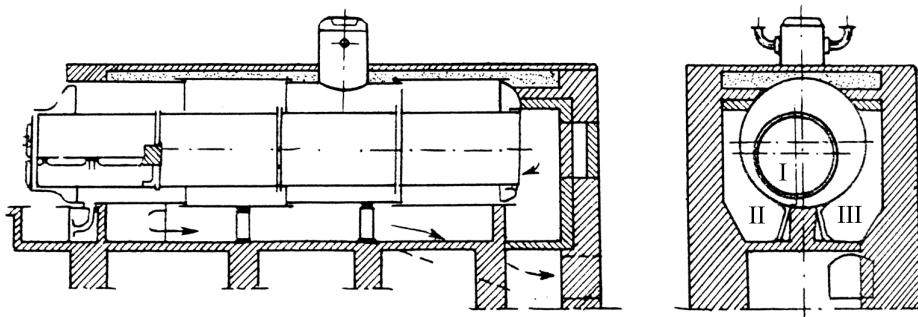
Kocioł płomienicowy jest jedną z najstarszych, bardzo udanych i rozpowszechnionych konstrukcji. Składa się z płaszcza (walczaka) oraz 1 lub 2 płomienic (najczęściej wykonuje się płomienice faliste, głównie w celu zmniejszenia naprężeń cieplnych i przedłużenia żywotności kotła). Spaliny z paleniska przepływają wzdłuż płomienicy, będącej kanałem I przepływu spalin, dalej kanałem II, wzdłuż powierzchni bocznej walczaka, i następnie kanałem III do komina (rys. 8.3).

Zalety tych kotłów to prosta budowa i łatwość obsługi, wadą jest stosunkowo duże zapotrzebowanie powierzchni na fundament oraz znaczny czas uruchamiania kotła [5].

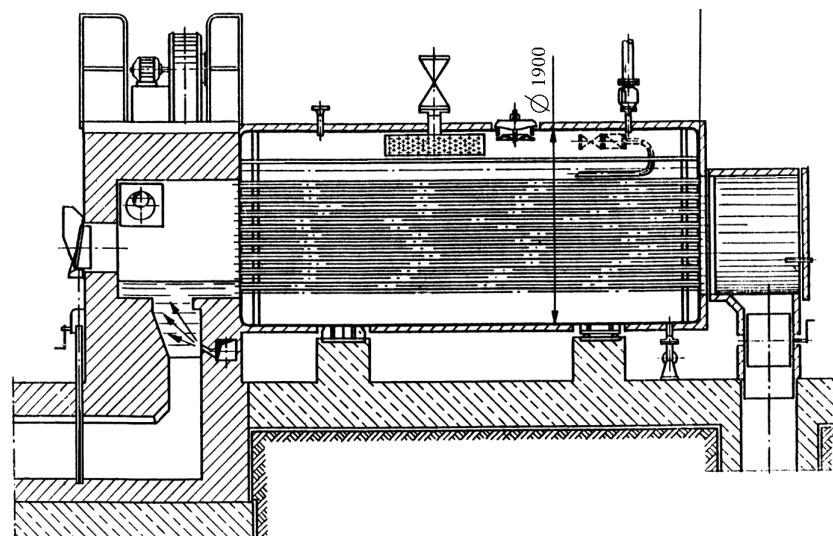
Rys. 8.2. Kocioł pionowy: 1 – palenisko,  
2 – ruszt, 3 – króćciec odprowadzania pary, 4 – komin [8]

#### Kotły płomieniówkowe

Kocioł płomieniówkowy składa się z szeregu płomieniówek, które są umocowane w dnach płaszczu stalowego (walczaka) wypełnionego wodą (rys. 8.4). Kotłów tego typu raczej już się nie buduje, ze względu na często występujące nieszczelności spowodowane przez naprężenia termiczne zbyt sztywnej konstrukcji [5].



Rys. 8.3. Kocioł płomienicowy [8]



Rys. 8.4. Kocioł płomieniówkowy [5]

### 8.2.2. Kotły wodnorurkowe

Kotły o małej pojemności wodnej, zwane **wodnorurkowymi** lub **opłomkowymi** (oplomka to rura, którą przepływa woda, na zewnątrz jest omywana spalinami), charakteryzują się dużą wydajnością i wysokim ciśnieniem pary. Dzięki tym zaletom,

a także małemu zapotrzebowaniu powierzchni oraz łatwości obsługi, kotły te znalazły duże zastosowanie, przede wszystkim jako kotły energetyczne i ciepłownicze.

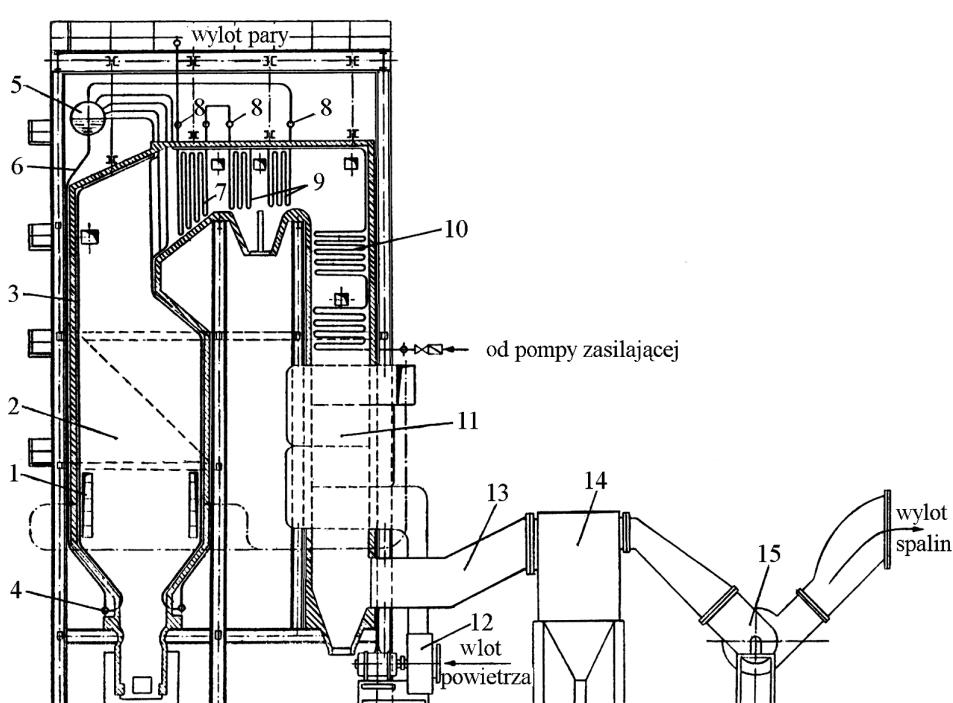
Kocioł wodnorurkowy składa się z walczaka lub walczaków oraz pęczka lub pęczków rur zawalcowanych w walczaku, przez które przepływa woda, a z zewnątrz omywają je spaliny.

Kotły tego typu dzieli się na **sekeyjne, stromorurkowe i opromieniowane**. Największą wydajność mają kotły opromieniowane.

Kotły wodnorurkowe mogą mieć różnego rodzaju paleniska. Kotły parowe opalane węglem o wydajności do 30 kg/s zwykle buduje się z paleniskiem rusztowym (rys. 8.1). Jeżeli wymagana jest większa wydajność takiego kotła, występują trudności eksploatacyjne z odpowiednio dużym rusztem, dlatego w większych kotłach węglowych stosowane są paleniska pyłowe lub fluidalne. Węgiel przeznaczony do spalania w paleniskach pyłowych jest mielony na pył.

### Kotły pyłowe

Na rysunku 8.5 przedstawiono schemat wodnorurkowego kotła opromieniowanego z paleniskiem komorowym, typu pyłowego [5] (w odróżnieniu od wodnorurkowego kotła rusztowego – rys. 8.1).



Rys. 8.5. Wodnorurkowy kocioł opromieniowany: 1 – palniki pyłowe, 2 – komora spalania, 3 – rury parownika, 4 – komory zbiorcze, 5 – walczak, 6 – rury opadowe, 7 – przegrzewacz pary, 8, 9 – komory i wężownice przegrzewacza, 10 – podgrzewacz wody, 11 – podgrzewacz powietrza, 12 – wentylator podmuchowy, 13 – kanał spalin, 14 – elektrofiltr, 15 – wentylator wyciągowy [5]

Zmielony na pył węgiel jest wdmuchiwany z powietrzem przez palniki (1) do komory paleniskowej (2), gdzie ulega spalaniu. Spaliny, po wylocie z komory paleniskowej, przepływają przez przegrzewacz pary (7), (9), a następnie przez podgrzewacz wody (10) i podgrzewacz powietrza (11). Dalej spaliny kanałem (13) przepływają do urządzenia odpylającego (14) i wentylatorem wyciągowym (15) są podawane do komina. Powietrze jest tłoczone do kotła wentylatorem (12).

Ściany komory paleniskowej (2) kotła opromieniowanego są wyłożone rurami parownika (3) (ekranami), połączonymi u dołu komorami zbiorczymi (4), a u góry walczakiem (5). Woda z walczaka (5) jest doprowadzana do komór (4) rurami opadowymi (6). W komorze paleniskowej zachodzi w wysokiej temperaturze intensywne spalanie mieszanki pyłowo-powietrznej, dlatego ciepło do ekranów (3) jest przekazywane głównie przez promieniowanie i stąd nazwa kocioł *opromieniowany*. Woda w rurach ekranowych (3) nagrzewa się i odparowuje. Ponieważ mieszanina wodno-parowa ma znacznie mniejszą gęstość niż zimna woda, jest więc wypierana rurami wznoszącymi do walczaka (5), przez chłodniejszą wodę z rur opadowych (6). W walczaku następuje oddzielenie pary, która przepływa do przegrzewacza (7), składającego się z komór (8) i wężownic (9). Woda z walczaka ponownie spływa rurami opadowymi do parownika (3).

Walczak, rury opadowe i wznoszące oraz komory tworzą **parownik**. Ruch wody w parowniku odbywa się pod wpływem naturalnej siły wyporu, a kocioł taki nazywa się kotłem z naturalnym obiegiem wody.

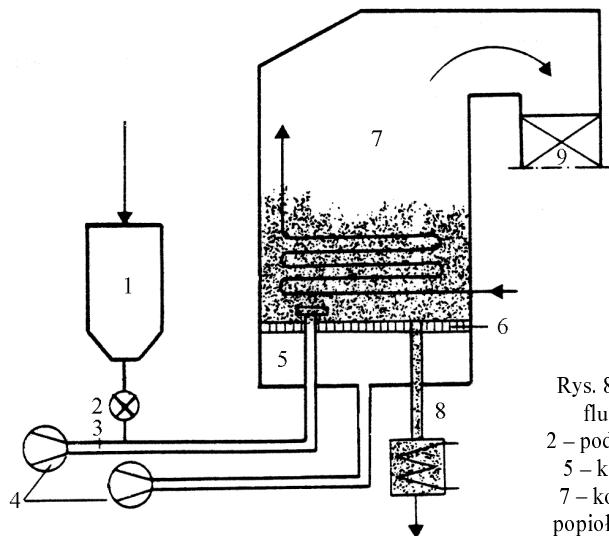
### Kotły fluidalne

Stosunkowo nową, odrębną grupę instalacji kotłowych stanowią kotły z **paleniskiem fluidalnym**. Fluidalne paleniska kotłowe zawdzięczają swój rozwój przede wszystkim niskiej temperaturze spalania w warstwie fluidalnej (800–900 °C), która powoduje niewielką emisję NO<sub>x</sub> oraz umożliwia efektywne usuwanie SO<sub>2</sub> ze spalin już w palenisku. Do innych zalet palenisk fluidalnych należy możliwość spalania węgli bardzo zawiigoconych oraz zapopielonych (zawierających ponad 25% części mineralnych) oraz różnego rodzaju paliw odpadowych.

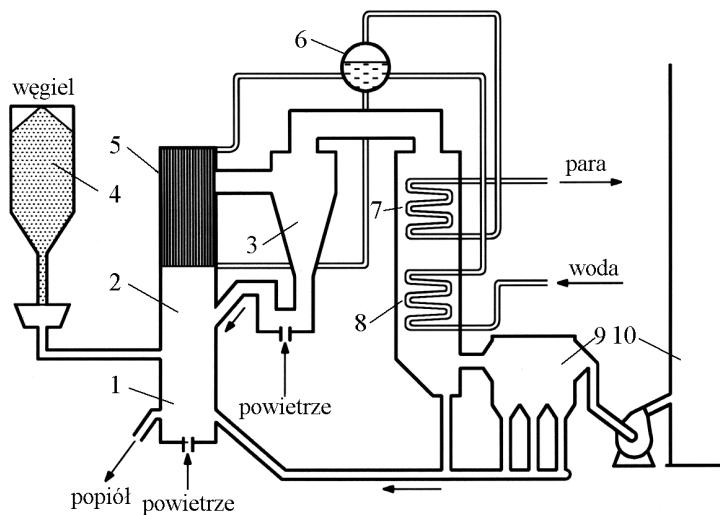
Palenisko fluidalne ma od spodu ruszt fluidyzujący, nad którym jest warstwa rozdrobnionego materiału inertnego, zwykle jest to krzemionka (piasek) z popiołem. Przepływające przez ruszt fluidyzujący powietrze wywołuje zjawisko fluidyzacji złożu i spalanie węgla w złożu. Zawartość węgla w złożu fluidalnym mieści się w zakresie 2–6%. Wyróżnia się dwa podstawowe typy palenisk fluidalnych: ze złożem **pęcherzykowym** (stacjonarnym) oraz ze złożem **cyrkulującym** (rys. 8.6 i 8.7).

Układ woda–para kotła fluidalnego składa się z typowych elementów: podgrzewacz wody, walczak, parownik i przegrzewacz pary. Jego cechą charakterystyczną jest natomiast umieszczenie części przegrzewacza pary w komorze paleniskowej.

Złożę pęcherzykowe (stacjonarne) to warstwa rozdrobnionego materiału stałego (piasek, popiół i sorbent wapniowy) o wysokości 0,6–1,0 m nad rusztem fluidyzującym, przez który przepływa powietrze z szybkością 1–3 m/s (rys. 8.6) [10]. Prędkość przepływu powietrza fluidyzującego i rozmiar cząstek w złożu są tak dobrane, żeby nie następowało wynoszenie materiału złożu, które pozostaje stacjonarne.



Rys. 8.6. Kocioł ze stacjonarnym złożem fluidalnym: 1 – zasobnik z węglem, 2 – podajnik, 3 – rurociąg, 4 – wentylatory, 5 – komora powietrzna, 6 – dno sitowe, 7 – komora spalania, 8 – odprowadzanie popiołu, 9 – powierzchnie ogrzewalne [5]



Rys. 8.7. Instalacja kotłowa z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym:  
 1 – ruszt fluidyzujący, 2 – komora paleniskowa, 3 – separator cyklonowy,  
 4 – zasobnik węgla, 5 – parownik, 6 – walczak, 7 – przegrzewacz pary,  
 8 – podgrzewacz wody, 9 – elektrofiltr, 10 – komin

W cyrkulującym złożu fluidalnym prędkość powietrza fluidyzującego jest znacznie większa (5–10 m/s), co powoduje, że złożo się rozwarcia: u dołu większe cząstki tworzą złożo pęcherzykowe, mniejsze – rozrzedzoną warstwę wierzchnią, a najmniejsze cząstki są wynoszone, tworząc cyrkulującą część złożo. Ważnym elementem kotła ze złożem cyrkulującym jest separator cząstek, który powoduje, że wynoszone ze spalinami cząstki złożo są w nim wytrącane ze spalin i zawracane do złożo. Na rysunku 8.7 przedstawiono schemat kotła fluidalnego z separatorem cyklonowym. Istnieją też separatory cząstek typu *kompaktowego*, które mieszczą się całkowicie w komorze paleniskowej.

Cyrkulacja mniejszych cząstek między komorą paleniskową i cyklonem (separatorem) znacznie zwiększa prędkość spalania cząstek paliwa stałego i intensyfikuje wymianę ciepła, dlatego kotły z cyrkulującym złożem fluidalnym osiągają moc cieplną 600 MW i są stosowane w dużych blokach cieplowniczych oraz jako kotły parowe do bloków energetycznych osiągających moc ponad 250 MW<sub>e</sub>. Kotły z pęcherzykowym złożem fluidalnym z zasadą są budowane do mocy cieplnej kilkudziesięciu megawatów.

### 8.3. Kotły parowe energetyki zawodowej

W energetyce zawodowej wielu krajów dominują bloki energetyczne z kotłami parowymi opalonymi węglem. Najważniejsze cechy tych kotłów najnowszej generacji to: duża wydajność, niezbędna do zapewnienia wymaganej mocy bloków energetycznych (tab. 8.1), parametry pary zapewniające dobrą sprawność bloków energetycznych i niezawodność. Takie wymagania spełniają wodnorurkowe kotły opromieniowane lub opromieniowane konwekcyjne z paleniskami pyłowymi. Zwiększa się także liczba energetycznych kotłów fluidalnych charakteryzujących się przede wszystkim dobrymi parametrami „ekologicznymi”.

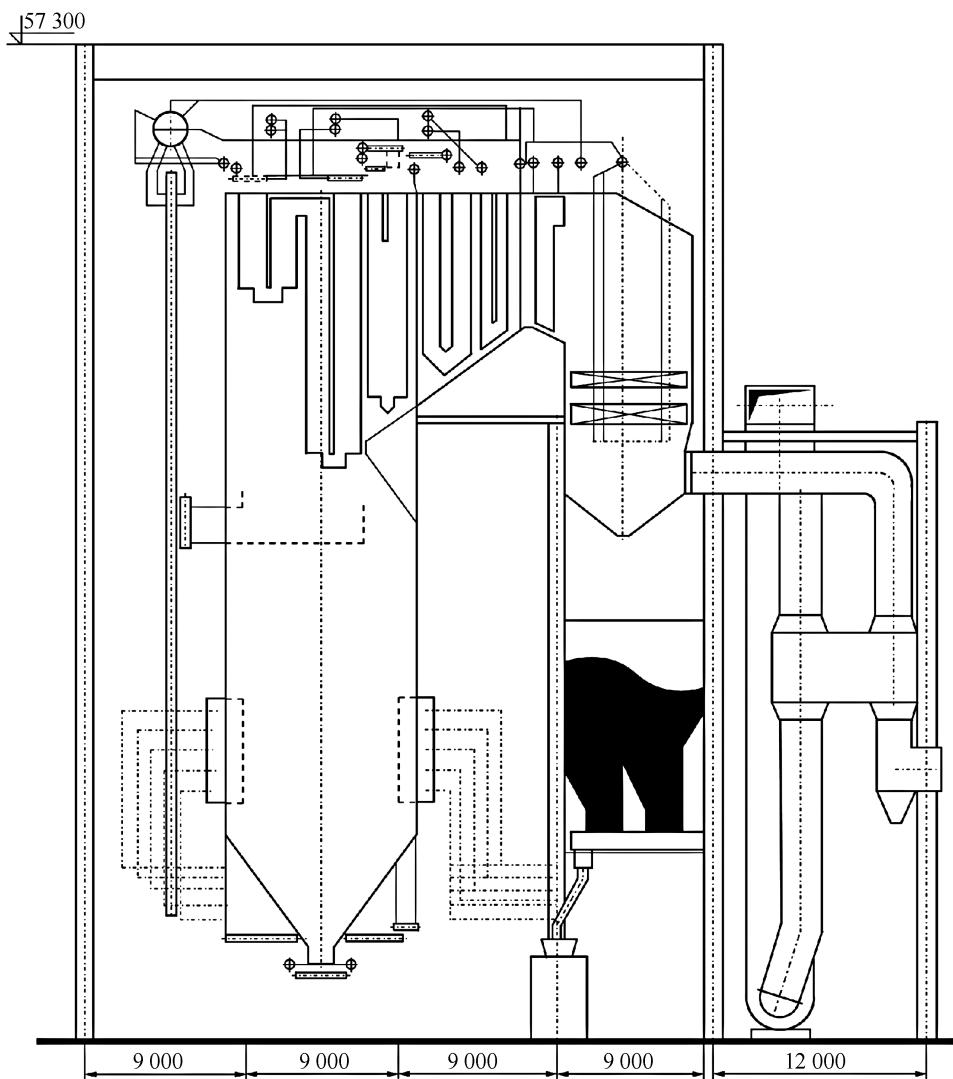
Tabela 8.1. Parametry typowych bloków energetycznych

Moc bloku, MW	50	120	200	360	400	500	600	800	1000	1300
Wydajność kotła, kg/s	64	106	182	320	360	460	520	670	890	1170

Ze względu na parametry produkowanej pary rozróżnia się kotły na parametry nad- i podkrytyczne, granicą rozdziału między nimi jest ciśnienie pary 22,1 MPa. Typowe parametry pary w zakresie podkrytycznym to: ciśnienie od 13 do 19 MPa i temperatura około 540 °C [3]. Nowoczesne bloki mają kotły wytwarzające parę o parametrach: ciśnienie do 26 MPa i temperatura sięgająca 600 °C. Dzięki tej zmianie parametrów pary sprawność współczesnych bloków energetycznych na węgiel kamienny zwiększyła się od około 40 do 45%.

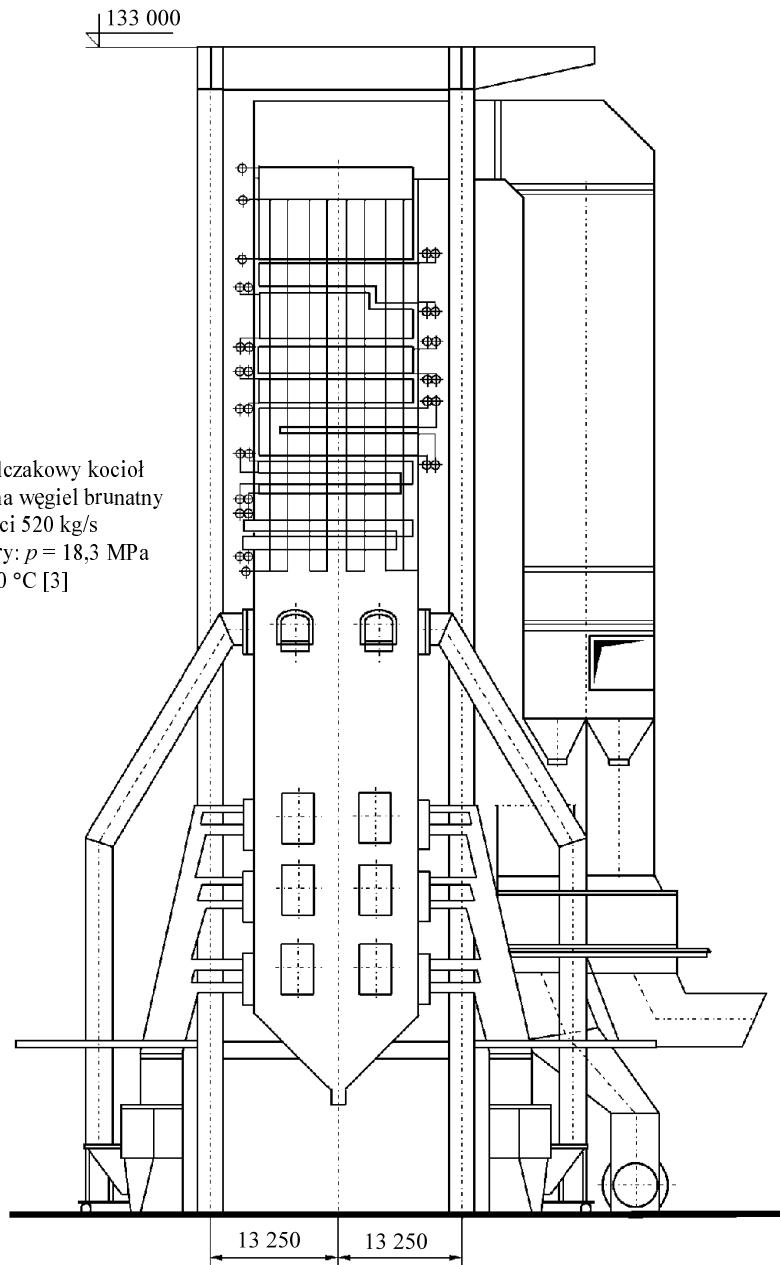
Zmiana parametrów pary w kotłach energetycznych z pod- na nadkrytyczne ma także duże znaczenie dla konstrukcji kotłów. Przede wszystkim wymagała opracowania nowych, bardziej wytrzymały stali na elementy układu woda–para. Ponadto zmieniła charakter obiegu wodnego: z naturalnego (lub wspomaganego) na wymuszony pracą pompy zasilającej. Kotły na parametry nadkrytyczne pary nie mają już walczaka, są to kotły **przepływowe**.

Energetyczne kotły pyłowe różnią się sylwetką. Kotły z obiegiem naturalnym wody zwykle budowano jako dwuciągowe (np. walczakowy kocioł pyłowy na węgiel brunatny OP-650 do bloku o mocy 200 MW<sub>e</sub> – rys. 8.8).



Rys. 8.8. Walczakowy kocioł parowy OP-650 na węgiel kamienny o wydajności 182 kg/s i parametrach pary:  $p = 13,5 \text{ MPa}$  i  $T = 540^\circ\text{C}$  [3]

Współczesne kotły parowe o dużej wydajności buduje się jako przepływowe kotły jednociągowe (rys. 8.9). Bloki energetyczne najnowszej generacji o mocy 800–900 MW<sub>e</sub> mają jednociągowe kotły przepływowe na parametry nadkrytyczne, których wysokość przekracza 160 m [3].



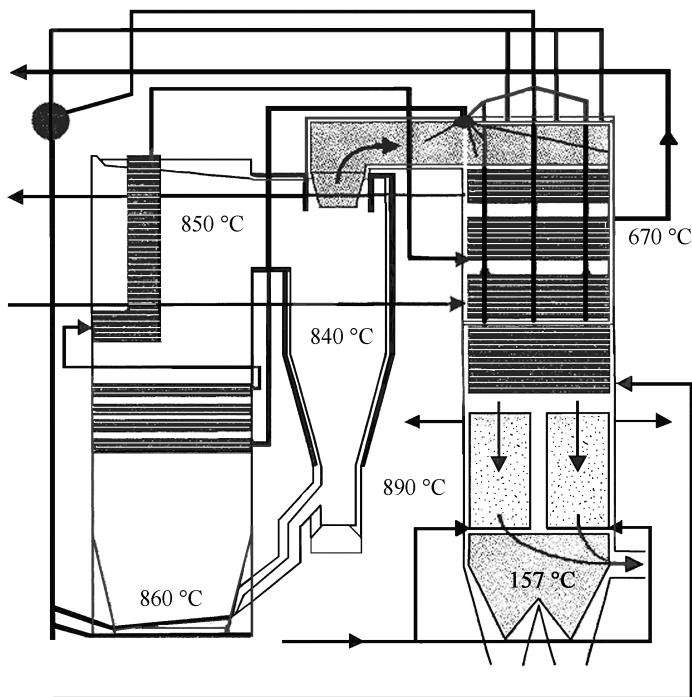
Rys. 8.9. Bezwalczakowy kocioł parowy BB-1880 na węgiel brunatny o wydajności 520 kg/s i parametrach pary:  $p = 18,3 \text{ MPa}$  i  $T = 540^\circ\text{C}$  [3]

Energetyczne kotły parowe są opalane przede wszystkim węglem kamiennym lub brunatnym (oba rodzaje węgla mają zalety i wady jako paliwo kotłowe). Bloki

energetyczne z kotłami opalanymi węglem brunatnym, ze względu na znacznie większą zawartość w nim wody (p. 6.1), mają o 4–5% mniejszą sprawność niż kotły na węgiel kamienny, a ponadto mają większe rozmiary. Kotły te różnią się pod względem konstrukcji, przede wszystkim w układzie nawęglania kotłów (p. 7.3.1).

W energetyce zawodowej, a zwłaszcza w ciepłownictwie, obserwuje się intensywny rozwój fluidalnej techniki kotłowej. Kotły fluidalne ze złożem cyrkulującym osiągają wydajność 186 kg/s, a bloki energetyczne z takimi kotłami osiągają moc 250 MW<sub>e</sub> [2]. Do ważnych dla energetyki zalet kotłów fluidalnych należą: mała emisja NO<sub>x</sub>, wiązanie SO<sub>2</sub> w złożu (brak instalacji mokrego odsiarczania spalin), uproszczenie układu przygotowania paliwa (brak młynów węglowych) i wysoka sprawność.

Charakterystycznym elementem kotłów fluidalnych ze złożem cyrkulującym jest układ nawrotu złoża z dwoma lub czterema cyklonami. W kotłach fluidalnych nowszej generacji separatory cyklowe zastąpiono separatorami kompaktowymi, umieszczonymi w górnej części komory spalania. Na rysunku 8.10 pokazano schemat takiego parowego kotła fluidalnego na węgiel brunatny do bloku o mocy 235 MW<sub>e</sub> [2].



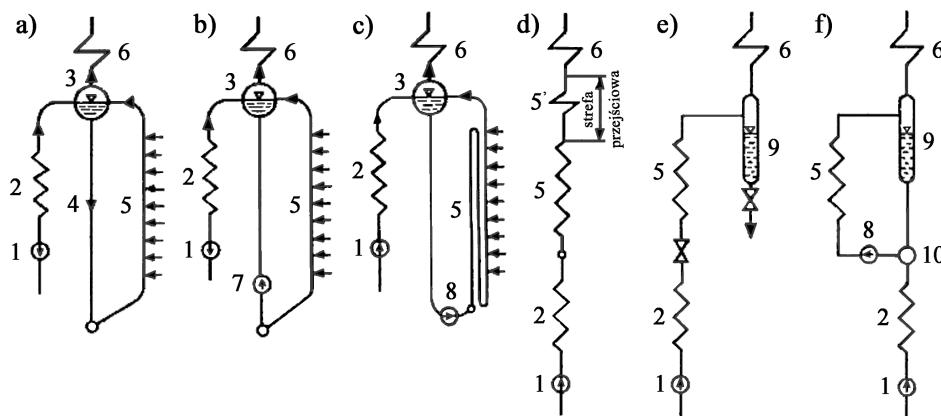
Rys. 8.10. Parowy kotiel fluidalny CFB-670 ze złożem cyrkulującym na węgiel brunatny o wydajności 185,4 kg/s i parametrach pary:  $p = 13,1 \text{ MPa}$ ,  $T = 540 \text{ }^{\circ}\text{C}$  [2]

## 8.4. Obieg wody w kotłach

W procesie wytwarzania pary w kotle rozróżnia się następujące fazy: podgrzewanie wody, parowanie i przegrzewanie pary. Para jest wytwarzana w parowniku,

w którym ruch wody i mieszaniny parowo-wodnej (cyrkulacja) nazywa się **obiegiem wody**. Rozróżnia się następujące typy kotłów ze względu na obieg wody (rys. 8.11):

- z naturalnym obiegiem wody,
- ze wspomaganym obiegiem wody,
- z wymuszonym obiegiem wody,
- przepływowe.



Rys. 8.11. Obiegi wodne kotłów parowych: a) kocioł walczakowy z obiegiem naturalnym, b) kocioł walczakowy z obiegiem wspomaganym, c) kocioł walczakowy z obiegiem wymuszonym (La Monta), d) kocioł przepływowego, e) kocioł przepływowy z wodooddzielaczem, f) kocioł z obiegiem kombinowanym [1]; 1 – pompa wody zasilającej, 2 – podgrzewacz wody, 3 – walczak, 4 – rury opadowe, 5 – rury wznoszące, 6 – przegrzewacz pary, 7 – pompa wspomagająca, 8 – pompa przewałowa, 9 – wodooddzielacz, 10 – mieszalnik

Kotły z obiegiem naturalnym wody mają walczak, z którego chłodniejsza woda spływa rurami opadowymi do parownika, wypychając cieplejszą mieszaninę parowo-wodną do walczaka. W wyniku działania siły wyporu, wywołanej różnicą gęstości mieszaniny parowo-wodnej, woda wielokrotnie cyrkuluje w parowniku. Oddzielona w walczaku para jest kierowana do przegrzewacza (rys. 8.11a).

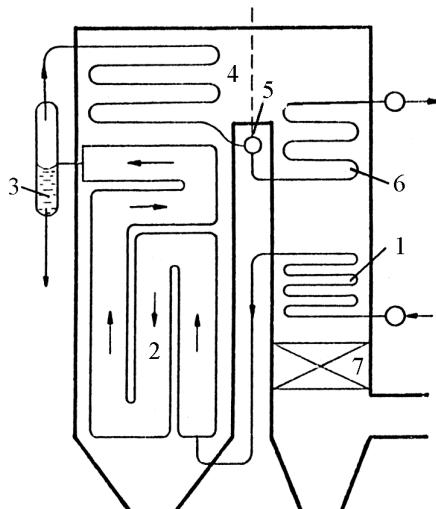
Wraz ze wzrostem ciśnienia różnice gęstości mieszaniny parowo-wodnej, wynikające ze zmian temperatury, stają się coraz mniejsze i dla ciśnienia w zakresie 16–18 MPa cyrkulacja naturalna w parowniku staje się niewystarczająca. W celu poprawy cyrkulacji wody stosuje się pompę wspomagającą, która tworzy dodatkową różnicę ciśnienia, wspomagającą przepływ wody przez parownik: nazywa

się to wspomaganym obiegiem wody (rys. 8.11b). W kotłach walczakowych z wymuszonym obiegiem wody (systemu La Monta) to pompa obiegowa głównie wywołuje cyrkulację, pobierając wodę z walczaka i przetłaczając ją przez rury parownika. Para jest oddzielana w walczaku i odprowadzana do przegrzewacza (rys. 8.11c) [1].

Duże kotły energetyczne, w których ciśnienie pary jest zbliżone do wartości krytycznej (22,1 MPa), buduje się jako kotły przepływowe, bez cyrkulacji naturalnej lub z cyrkulacją naturalną wspomagającą. Podgrzewacz wody, parownik i przegrzewacz pary są połączone szeregowo, brakuje natomiast walczaka (rys. 8.11d–f). Woda tłoczona pompą zasilającą, przepływając przez podgrzewacz i parownik, zostaje podgrzana i odparowana, a następnie para wodna ulega przegrzaniu w przegrzewaczu.

W dominującej obecnie w energetyce grupie kotłów przepływowych występują różnice konstrukcyjne, wynikające przede wszystkim z rozwiązań przyjętych przez firmy kotłowe w zakresie obiegów wodnych. Na rysunkach 8.11d–f przedstawiono kolejne schematy obiegów wodnych kotłów przepływowych: Bensoina, Ramzina i Sulzera. W kotle Sulzera (rys. 8.12) na przykład woda jest podawana przez pompę do podgrzewacza wody (1), a następnie do parownika (2), dalej przez wodooddzielacz (3)

do I stopnia przegrzewacza (4). Regulacja temperatury pary odbywa się przez wtrysk wody (5), dalej para jest podawana do II stopnia przegrzewacza (6), a następnie do turbiny parowej [5].



Rys. 8.12. Kocioł Sulzera: 1 – podgrzewacz wody,  
2 – parownik, 3 – wodooddzielacz,  
4 – I stopień przegrzewacza, 5 – wtrysk wody,  
6 – II stopień przegrzewacza, 7 – podgrzewacz  
powietrza [5]

## 8.5. Elementy instalacji kotłowej

### 8.5.1. Powierzchnie ogrzewalne kotła

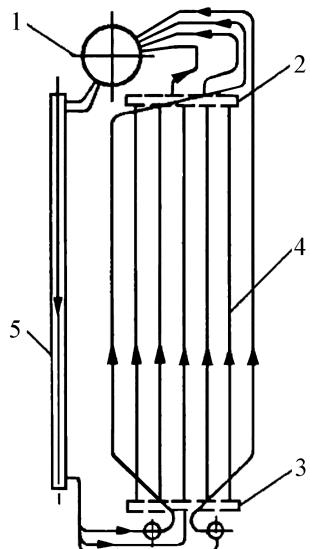
Powierzchnie ogrzewalne kotła mają kontakt ze spalinami, od których przejmują ciepło i przekazują je wodzie. W drodze z komory spalania do komina spaliny przepływają przez parownik, przegrzewacze pary, podgrzewacz wody i podgrzewacz

powietrza. W celu uzyskania maksymalnej sprawności kotła dąży się do jak najlepszego wykorzystania ciepła spalin. W tym celu właśnie przed wyłotem spalin do komina instaluje się podgrzewacz wody, a za nim jeszcze podgrzewacz powietrza. Powierzchnie ogrzewalne, wykonane w przeważającej mierze z rur, muszą być wytworzone ze specjalnej stali (kotłowej), ponieważ działa na nie wiele niekorzystnych czynników: wysoka temperatura i duże ciśnienie oraz ulegają korozji i erozji.

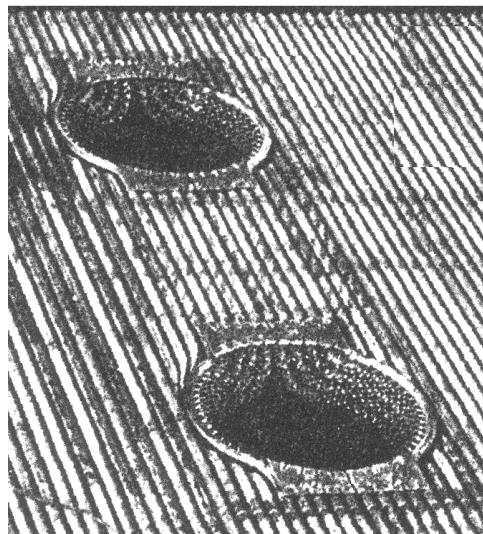
### Parownik

Zadaniem parownika jest odparowanie wody. W kotłach z naturalnym obiegiem wody najważniejszymi elementami parownika są: walczak, opłomki, komory i rury łączące. Kotły przepływowo na parametry podkrytyczne zamiast walczaka mają wodooddzielacz (rys. 8.11).

W nowoczesnych wodnorurkowych kotłach opromieniowanych i konwekcyjno-opromieniowanych rury wodne są ułożone na ścianach komory paleniskowej, tworząc tzw. powierzchnie opromieniowane (ekrany), walczak i komory znajdują się natomiast poza strefą spalin. Włączenie ekranów w obieg wody przedstawiono na rysunku 8.13, a ich wygląd – na rysunku 8.14.

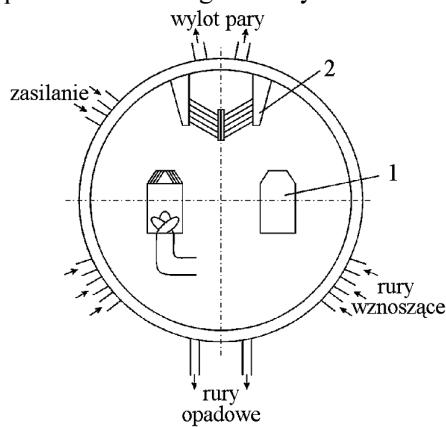


Rys. 8.13. Przykłady połączeń elementów parownika: 1 – walczak, 2, 3 – komory, 4 – ekrany, 5 – rury opadowe [5]



Rys. 8.14. Fragment powierzchni parownika (ekranów) z otworami na palniki

**Walczak** jest podłużnym zbiornikiem, do którego jest dostarczana woda zasilająca i w którym następuje oddzielenie pary od wody przez znajdujące się w nim separatory pary (8.15). Do zadań walczaka należy także prawidłowy rozpływ wody w powierzchniach ogrzewalnych kotła.



Ze względu na duże rozmiary walczaków (średnica w większych kotłach przekracza 2 m), duże ciśnienie i wysoką temperaturę pary są one najbardziej narażone na zniszczenie elementami ciśnieniowymi kotłów. Ściany walczaka mają grubość 75–100 mm.

Rys. 8.15. Walczak w przekroju:

1 – bateria cyklonów, 2 – separatory żaluzjowe

### Przegrzewacz pary

Zadaniem przegrzewacza pary jest podniesienie temperatury pary do wymaganej wartości (ponad temperaturę nasycenia pary pod danym ciśnieniem). Przegrzewacze pary składają się z komór, wężownic, sprzętu i armatury. Duże przegrzewacze dzieli się na dwa lub więcej stopni, żeby łatwiej regulować temperaturę pary.

W zależności od sposobu przejmowania ciepła wyróżnia się przegrzewacze: opromieniowane, konwekcyjne i kombinowane (złożone z części opromieniowanej i konwekcyjnej). Dla dużych ciśnień roboczych pary rozwija się powierzchnie przegrzewaczy opromieniowanych, umieszczając je nawet w komorze paleniskowej. Na rysunku 8.12 pokazano przykład lokalizacji przegrzewacza w kotle parowym.

### Podgrzewacz wody

Podgrzewacz wody jest rurowym wymiennikiem ciepła, zwykle ostatnim na drodze spalin przed opuszczeniem kotła. Wykonany jest z rur stalowych lub żeliwnych, przez które płynie woda kotłowa.

Wyróżnia się podgrzewacze wody bez odparowania („niekipiące”) i podgrzewacze wody parujące. Pierwsze z wymienionych to podgrzewacze żeliwne, w których woda jest podgrzewana do temperatury o 20–30° niższej od temperatury wrzenia, żeby uniknąć pulsacji i uderzeń wodnych, wywołanych parowaniem. Bardziej wytrzymałe są stalowe podgrzewacze parujące, w których następuje odparowanie 2–10% wody.

### 8.5.2. Urządzenia paleniskowe

**Palenisko** zajmuje centralne miejsce w kotle, a jego zadaniem jest wytworzenie warunków sprawnego spalania paliwa, z minimalną emisją zanieczyszczeń, w celu uzyskania odpowiedniego strumienia ciepła do powierzchni ogrzewalnych, aby zapewnić wymaganą wydajność kotła. Ważnym parametrem charakteryzującym palenisko jest obciążenie cieplne komory paleniskowej, wyrażane w watach na metr sześcienny,

$$q_v = \frac{BW_u}{V_k}, \quad \text{W/m}^3,$$

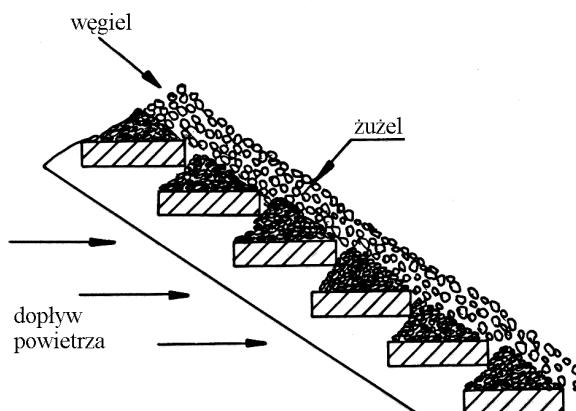
gdzie:  $B$ ,  $W_u$  i  $V_k$  oznaczają odpowiednio: strumień paliwa, jego wartość opałową i objętość komory paleniskowej.

Paleniska kotłowe dzieli się najogólniej na **warstwowe** (rusztowe), **komorowe** (palnikowe) i **fluidalne**. Do palenisk komorowych zalicza się paleniska: gazowe, olejowe i pyłowe. Paliwo dostarczane jest do nich przez **palniki**.

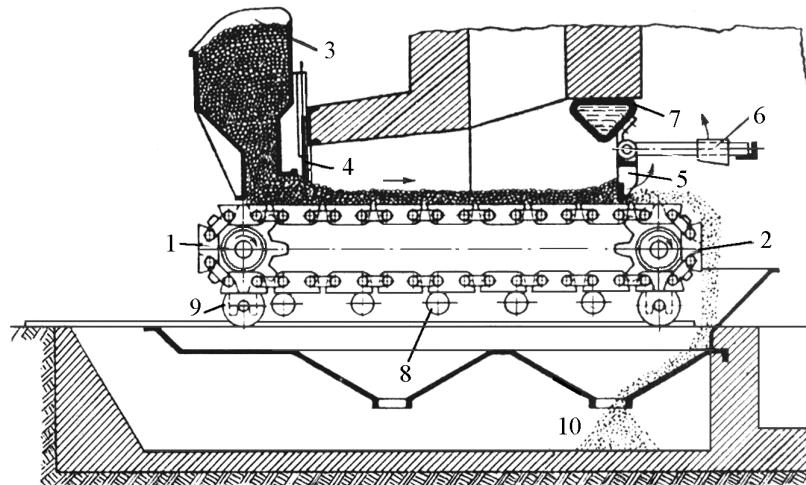
#### Paleniska warstwowe

W kotłach na paliwo stałe o wydajności do 30 kg/s najczęściej stosuje się **ruszty**, na których spalanie paliwa odbywa się w warstwie. Paleniska rusztowe są różne, dzieli się je na ruszty stałe i ruchome. W małych kotłach węglowych stosowane są poziome ruszty płaskie z ręcznym narzucaniem paliwa (rys. 8.2, 8.4). W większych kotłach stosuje się stałe ruszty z ruchomą warstwą paliwa, przykładem jest ruszt schodkowy (rys. 8.16), który składa się z ustawionych pochyło belek żeliwnych, do których umocowane są płyty żeliwne, tworzące stopnie. Pochylenie rusztu zależy od rodzaju paliwa. Wadą rusztów stałych jest uciążliwość obsługi oraz – w odniesieniu do płaskich rusztów – nierównomierność pracy paleniska.

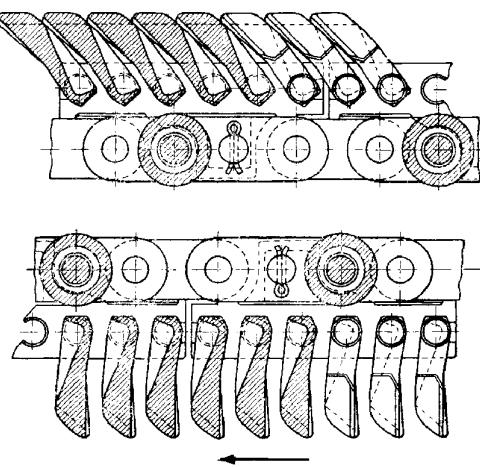
Rys. 8.16. Ruszt schodkowy



Obsługę kotła znacznie ułatwiają **ruszty ruchome** o całkowicie zmechanizowanym podawaniu węgla z zasobnika i oczyszczaniu z żużla. Na rysunku 8.17 pokazano palenisko z rusztem taśmowym [9]; ruchomy ruszt tworzy stalowa taśma bez końca, rozpięta między dwoma walcami, z których jeden jest napędzający. Strumień paliwa, podawany z zasobnika na taśmę, jest regulowany grubością warstwy paliwa.



Rys. 8.17. Ruszt taśmowy: 1, 2 – koła, 3 – zasobnik paliwa, 4 – warstwownica, 5 – zgarniacz, 6 – przeciwciężar, 7 – rura chłodząca, 8 – krążki podpierające taśmę, 9 – koło jezdne, 10 – popielnik [9]



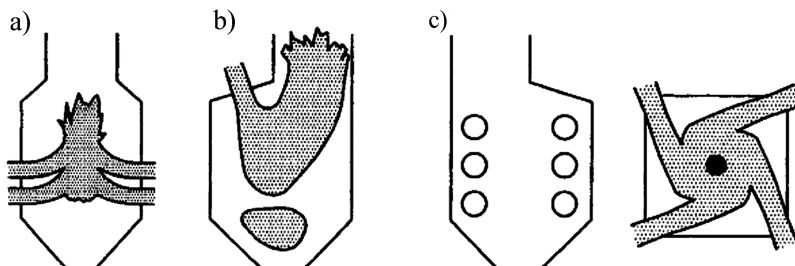
Rys. 8.18. Ruszt łuskowy: taśma górska i dolna

W kotłach węglowych o większej wydajności największe zastosowanie znalazły **ruszt luskowy**, który tworzą rusztowiny osadzone obrotowo (rys. 8.18). W górnej warstwie rusztowiny zachodzą na siebie, a w dolnej zwisają pionowo, co pozwala na samoczynne oczyszczanie rusztu z żużla i popiołu.

W związku z tendencją do zastępowania kotłów węglowych mniejszej mocy kotłami gazowymi lub olejowymi w ciepłownictwie i w energetyce przemysłowej znaczenie palenisk rusztowych bardzo zmalało. Paleniska rusztowe znalazły natomiast zastosowanie do spalania biomasy i odpadów. Ze względu na małą wartość opałową tych paliw, ich znaczne zawiłgocenie i niejednorodność rozmiarów, najbardziej przydatne do spalania biomasy i wielu typów odpadów okazały się ruszty posuwisto-zwrotne.

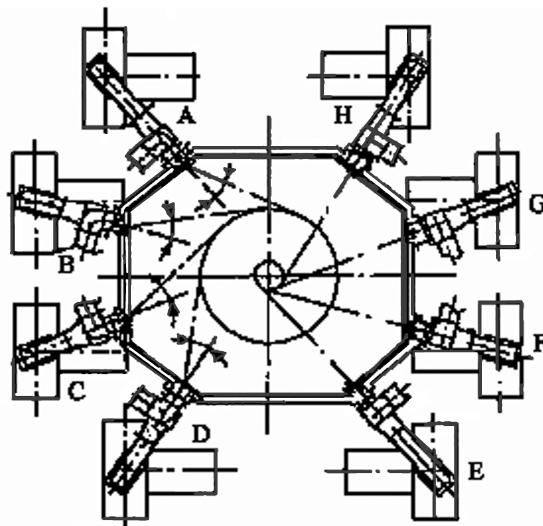
### **Paleniska pyłowe**

Opalone węglem kotły parowe największej wydajności mają paleniska pyłowe. Węgiel rozdrobniony w młynowni na pył jest wdmuchiwany palnikami pyłowymi z powietrzem do komory paleniskowej (rys. 8.5). Ze względu na usytuowanie palników na ścianach komory paleniskowej wyróżnia się następujące typy palenisk pyłowych: z palnikami mocowanymi czołowo (naściennie), z palnikami mocowanymi stropowo i z palnikami mocowanymi narożnie (tangencjalnymi) (rys. 8.19).

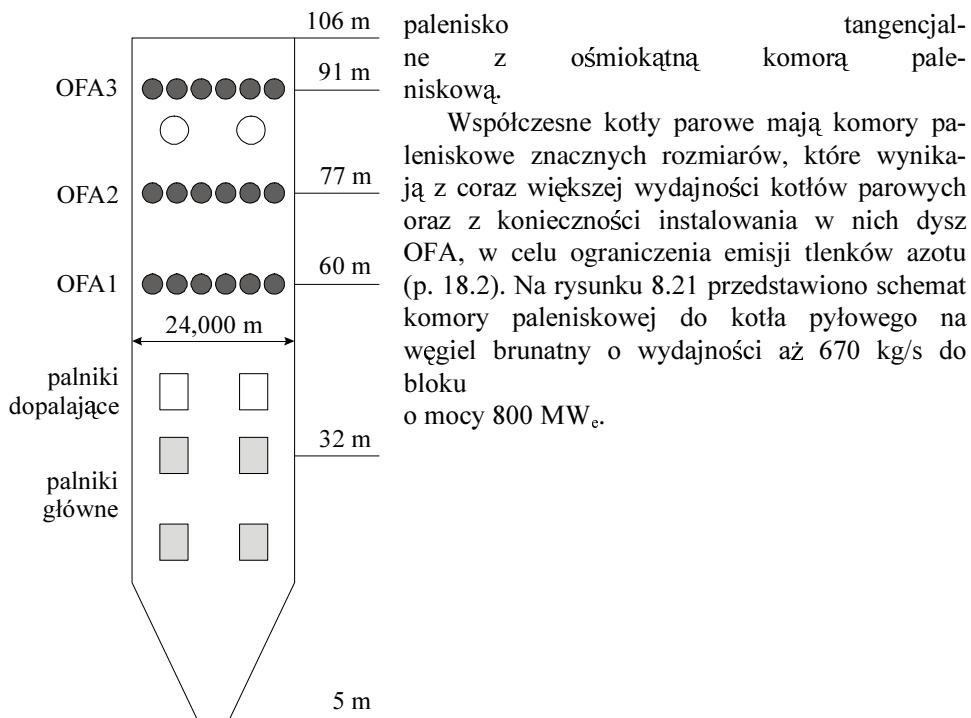


Rys. 8.19. Typy palenisk pyłowych: a) z palnikami mocowanymi naściennie, b) z palnikami mocowanymi stropowo, c) z palnikami mocowanymi narożnie (palenisko tangencjalne)

Komora paleniskowa kotła pyłowego jest ograniczona ścianami, wyłożonymi rurami ekranowymi parownika, a u dołu zakończona lejem żużłowym. Kształt komory paleniskowej w przekroju jest prostokątny, rzadziej ośmiokątny. Na rysunku 8.20 pokazano przekrój przez



Rys. 8.20. Przekrój przez palenisko tangencjalne kotła OP-650b na węgiel brunatny, A-H palniki pyłowe



Rys. 8.21. Komora paleniskowa  
z rozmieszczeniem palników  
i dysz OFA kotła pyłowego  
na węgiel brunatny o wydajności 670 kg/s

### Palniki pyłowe

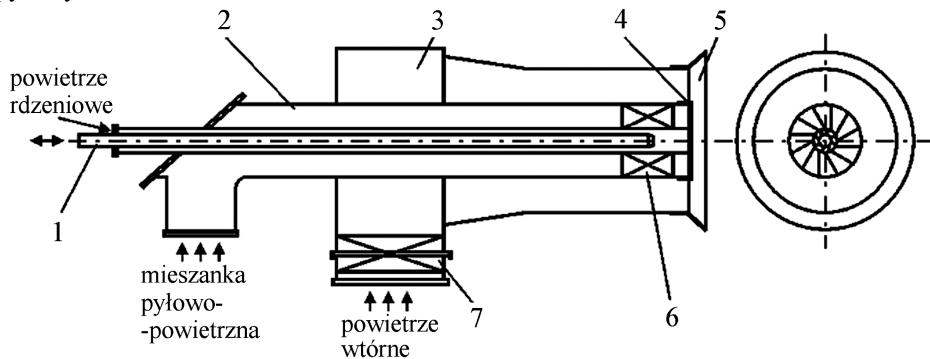
Zadaniem palnika kotłowego jest doprowadzenie paliwa i powietrza do paleniska, zapewnienie ich właściwego wymieszania i stabilizacja płomienia. W opalanych węglem kotłach pyłowych najczęściej są stosowane dwa typy palników pyłowych:

- wirowe,
- strumieniowe.

**Palnik wirowy** ma konstrukcję kilku koncentrycznie umocowanych przewodów, którymi przepływają: mieszanka pyłowo-powietrzna, powietrze i – specjalną *lancą* – olej opałowy (rys. 8.22). Mieszanka pyłowo-powietrzna przepływa centralnie przewodem pyłowym palnika, a powietrze do jej spalania (powietrze wtórne) przepływa przewodem okrężnym.

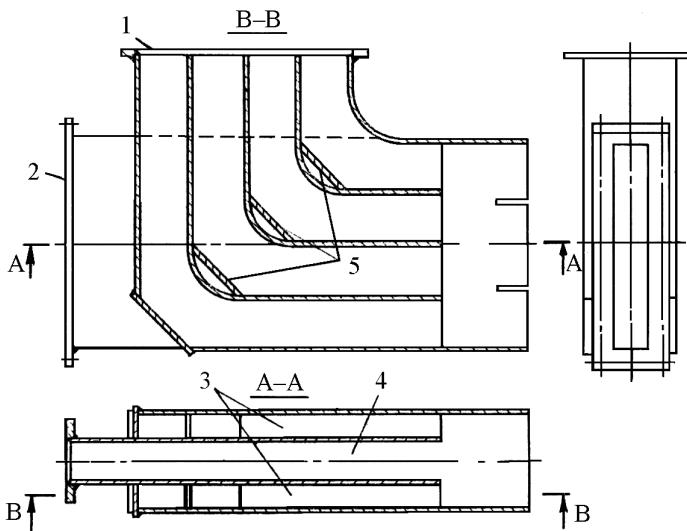
Nazwa palnika bierze się stąd, że do stabilności spalania powietrze wtórne jest silnie zawirowane, często zawirowuje się też strumień mieszanki pyłowo-powietrznej.

Zawirowywacze są montowane na wylocie palnika lub na wlocie do doprowadzenia powietrza wtórnego do palnika (w „skrzyni” powietrznej) (rys. 8.22). Wylot palnika wirowego zaopatrzony jest w dyfuzor. Palniki wirowe są instalowane w kotłach pyłowych naściennie.



Rys. 8.22. Pyłowy palnik wirowy: 1 – lana olejowa, 2 – pyłoprzewód, 3 – skrzynia powietrzna, 4 – statecznik płomienia, 5 – dyfuzor, 6 – zawirowywacz mieszanki pyłowo-powietrznej, 7 – regulowany zawirowywacz powietrza

**Palniki strumieniowe** różnią się pod względem konstrukcji od palników wirowych: kanał powietrza wtórnego nie ma zawirowywacza, a w kanale pyłowym nie ma palnika rozpałkowego. Palnik strumieniowy tworzy kilka dysz pyłowych, umieszczonych jedna nad drugą. Powietrze wtórne podawane jest kanałem otaczającym przewód pyłowy, jak na schemacie przedstawionym na rys. 8.23, albo – częściej – osobnymi kanałami, między przewodami pyłowymi.



Rys. 8.23. Pyłowy palnik strumieniowy: 1 – wlot mieszanki pyłowo-powietrznej, 2 – wlot powietrza wtórnego, 3 – kanał mieszanki pyłowo-powietrznej, 4 – kanał powietrza wtórnego, 5 – nakładka przeciw wycieraniu „kolana”

Palniki strumieniowe, stosowane przede wszystkim w paleniskach tangencjalnych, z zasady są mocowane w narożach kotła (8.20). Rozpałkowe palniki mazutowe mocowane są w palniku strumieniowym między dyszami pyłowymi lub odrębnie na ścianach kotła.

W paleniskach pyłowych ważną rolę pełnią **olejowe palniki rozpałkowe** (palniki lancowe), których zadaniem jest doprowadzenie kotła od stanu „zimnego” do odpowiedniego stanu termicznego. Paliwem w tych palnikach jest ciężki olej (mazut), który jest rozpylany w palenisku kotłowym za pomocą pary wodnej, doprowadzanej przewodem w *lancę olejową*. W pyłowych palnikach wirowych *lanka* olejowa jest umieszczona centralnie w przewodzie pyłowym palnika, chłodzona powietrzem *rdzeniowym* i wycofywana z paleniska po uruchomieniu palników pyłowych (rys. 8.22).

#### **Paleniska fluidalne**

Instalacja paleniskowa kotłów fluidalnych ze złożem cyrkulującym składa się z komory paleniskowej, zakończonej u dołu rusztem fluidyzującym (stanowiącym dysze rozprowadzające powietrze w komorze paleniskowej), przechodzącym od dołu w skrzynię dmuchową, do której doprowadzane jest powietrze fluidyzujące [2]. Na rysunku 8.24a przedstawiono powierzchnię rusztu fluidyzującego bez złożą, a na rysunku 8.24b zdjęcie pojedynczej dyszy dystrybutora powietrza.

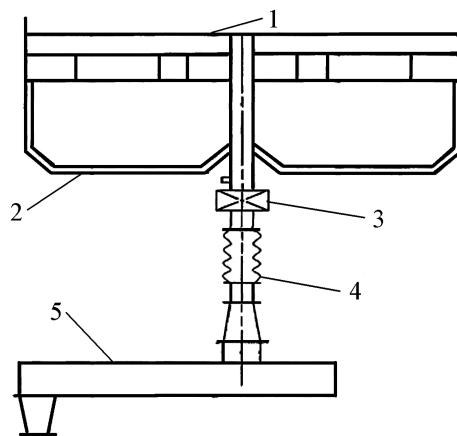
a)

b)



Rys. 8.24. Ruszt fluidyzujący (a), pojedyncza dysza powietrzna (b)

W dnie fluidyzacyjnym znajdują się **rury zsypowe** (od 2 do 7) do usuwania nadmiaru popiołu dennego ze złoża. Usunięty materiał złożą transportowany jest przez chłodzony wodą przenośnik ślimakowy do przenośnika zgrzebłowego (rys. 8.25).



Rys. 8.25. Rury zsypowe popiołu dennego w kotle fluidalnym CFB-670: 1 – ruszt fluidyzujący, 2 – skrzynia dmuchowa, 3 – zawór odcinający, 4 – złącze kompensacyjne, 5 – chłodnica śrubowa

Do instalacji paleniskowej w kotle fluidalnym z cyrkulującym złożem należy także układ **nawrotu materiału złożu** (częstek paliwa, popiołu i piasku), który jest porywany ze spalinami z komory paleniskowej. W przedstawionym schematycznie na rysunku 8.10 kotle fluidalnym CFB-670 nawrót popiołu zapewniają dwa cyklony, rury

opadowe i *syfon*. Ważną rolę pełni *syfon*, który jest niewielkim złożem fluidalnym zapewniającym zawracanie opadającego popiołu z powrotem do paleniska.

### 8.5.3. Instalacje przygotowania pyłu węglowego

#### Młynownie

Kotły pyłowe są opalane pyłem węglowym wytwarzanym w młynowniach, które dzieli się na:

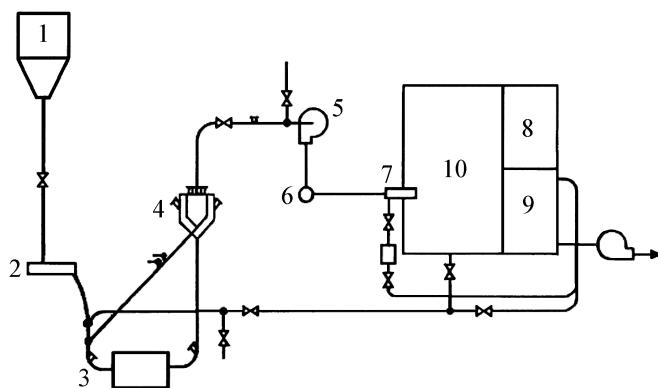
- centralne,
- indywidualne.

W **młynowniach centralnych** przygotowuje się i magazynuje pył węglowy dla całej kotłowni, **młynownie indywidualne** natomiast są związane z danym kotłem, pracując tylko na jego potrzeby.

W energetyce zawodowej, a zwłaszcza w kotłach parowych o dużej wydajności, z zasady stosuje się młynownie indywidualne. Schemat młynowni indywidualnej, z bezpośrednim podawaniem pyłu do palników pyłowych, przedstawiono na rysunku 8.26.

Przygotowanie pyłu węglowego obejmuje następujące operacje:

- wstępne rozdrabnianie,
- suszenie,
- mielenie.



Rys. 8.26. Układ młynów z bezpośredniem podawaniem pyłu do palników: 1 – zbiornik węgla, 2 – podajnik, 3 – młyn, 4 – odsiewacz, 5 – wentylator młynowy, 6 – rozdzielnica, 7 – palniki, 8 – podgrzewacz wody, 9 – podgrzewacz powietrza, 10 – kocioł

Wstępne rozdrabnianie węgla odbywa się w łamaczach lub kruszarkach (p. 7.3.1) [5]. Węgiel kamienny suszy się gorącym powietrzem podczas mielenia w młynach, węgiel brunatny natomiast suszy się najpierw w rurosuszarkach, a następnie w młynie gorącymi spalinami (p. 6.6.1). Węgiel jest mielony w młynach węglowych.

Kotły fluidalne nie wymagają mielenia węgla, rozdrabnia się go w kruszarkach (p. 7.3.1).

### Młyny węglowe

Ze względu na sposób rozdrabniania węgla i prędkość obrotową stosowane w elektrowni młyny dzieli się na:

- a) wolnobieżne (wykorzystanie siły ciężkości),
- b) średniobieżne (rozgniatanie),
- c) szybkobieżne (rozbijanie i ścieranie przez uderzenie).

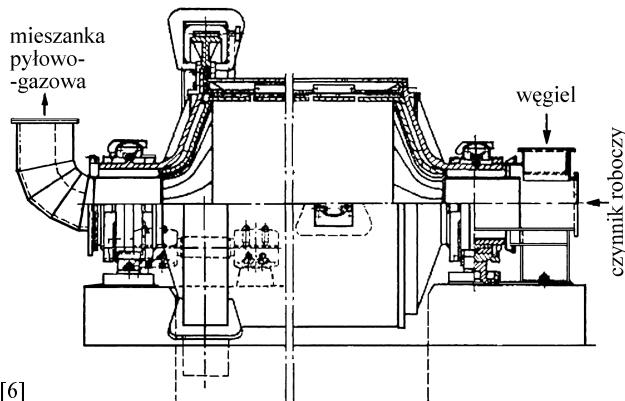
Dobór młyna zależy przede wszystkim od właściwości mielonego węgla:

➤ do przemiaru węgli o małej podatności przemiarowej stosuje się młyny wolnobieżne,

➤ do przemiaru energetycznych węgli kamiennych najczęściej są stosowane młyny średniobieżne,

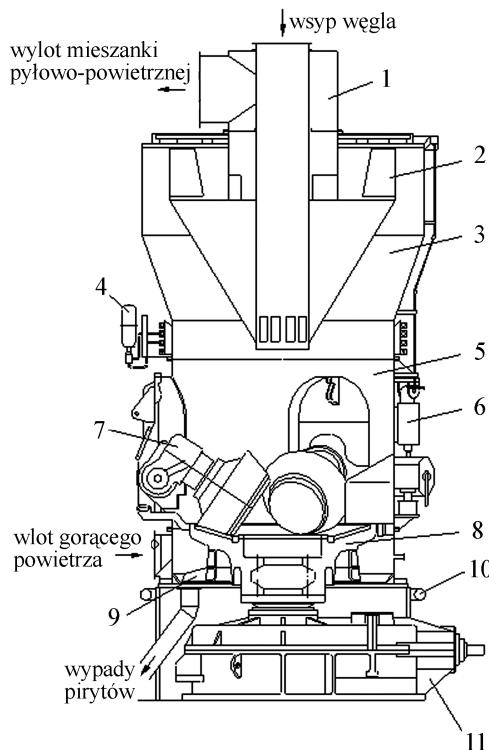
➤ do mielenia i suszenia węgli miękkich i bardzo wilgotnych, a więc węgli brunatnych i węgli kamiennych o dużej podatności przemiarowej, stosuje się młyny szybkobieżne.

Młyny bębnowo-kulowe są wolnobieżne, a węgiel jest w nich rozdrabniany przez rozgniatanie siłami ciężkości toczących się w stalowym bębnie ciężkich kul wykonanych ze specjalnej stali (rys. 8.27). Ze względu na duże zużycie energii na przemiar węgla przez te młyny, są one jeszcze stosowane tylko w mniejszych ciepłowniach.



Rys. 8.27. Mlyn bębnowo-kulowy [6]

W krajowej energetyce węglowej najczęściej stosuje się młyny średnio- i szybkobieżne. Do przemiaru węgla kamiennego zwykle się stosuje młyny kulowo-pierścieniowe i misowo-rolkowe (rys. 8.28), rzadziej młyny wentylatorowe.



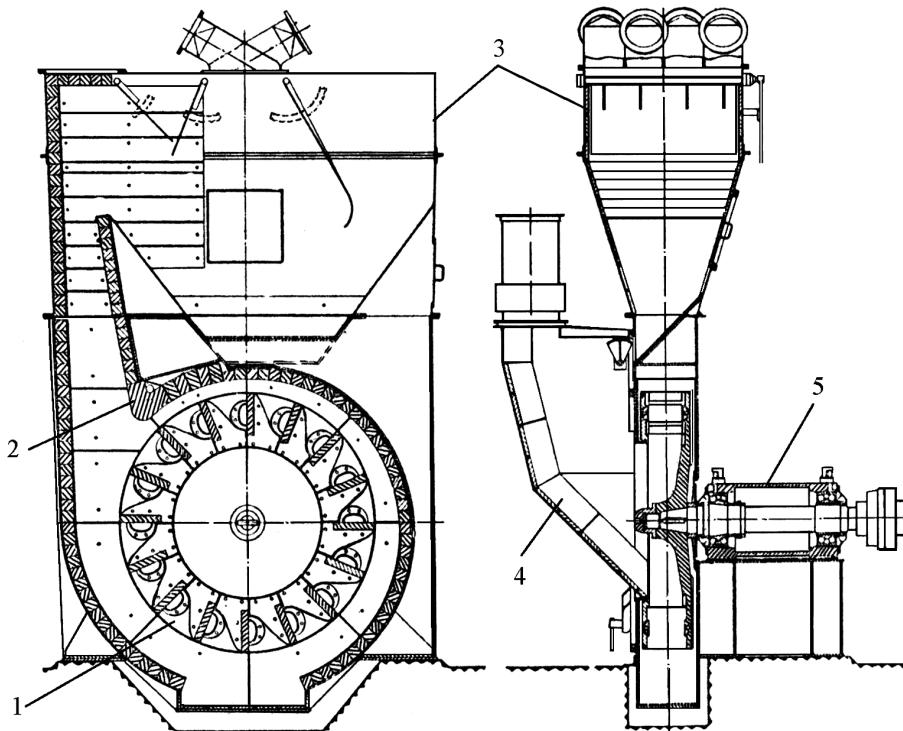
Rys. 8.28. Młyn misowo-rolkowy typu RP-1043x [3]:  
 1 – głowica wylotowa,  
 2 – kierownice odsiewacza,  
 3 – odsiewacz, 4 – hydroakumulator,  
 5 – komora młyńska, 6 – silownik  
 hydrauliczny docisku rolki, 7 – zespół rolki  
 8 – misa mieląca, 9 – zabieraki pyrytów,  
 10 – kolektor powietrza uszczelniającego,  
 11 – przekładnia mływna

Na rysunku 8.28 pokazano konstrukcję młyna średnioobieżnego typu misowo-rolkowego [3]. Młyn ma trzy rolki mielące, dociskane do obracającej się misy silownikiem hydraulicznym. Węgiel jest zsypywany na misę młyna, która – obracając się

– rozgniata go rolkami mielącymi. Do młyna jest dostarczane od spodu gorące powietrze, które suszy węgiel i wynosi pył węglowy do separatora (odsiewacza) i dalej transportuje go pyłoprowadzącymi do pyłowych palników kotłowych. Oddzielone w separatorze grubsze frakcje pyłu są zwracane z powrotem do młyna. Młyny tego typu stosowane są do kotłów pyłowych na węgiel kamienny w blokach energetycznych o mocy 360–800 MW.

Młyny szybkobieżne to przede wszystkim **młyny wentylatorowe**. Na rysunku 8.29 przedstawiono schemat szybkobieżnego młyna wentylatorowego, który jest dużym wentylatorem, wykonanym z opancerzonych elementów [1]. Wstępnie pokruszony węgiel opada **rurosuszarką** w strumieniu gorących spalin przez drzwi młyna na wirnik, zwany kołem bijakowym. Rozbijany przez łopatki wirnika i rzucany na opancerzone ściany wentylatora węgiel zostaje zmielony na pył. Mieszanka pyłowo-gazowa jest

kierowana do odsiewacza, skąd oddzielone grube frakcje pyłu wracają do młyna, a odpowiednio drobne frakcje są kierowane bezpośrednio do palników.



Rys. 8.29. Przekrój młyna wentylatorowego: 1 – koło bijakowe, 2 – opancerzenie obudowy spirali, 3 – odsiewacz, 4 – drzwi młyna, 5 – silnik [4]

#### 8.5.4. Podgrzewacze powietrza

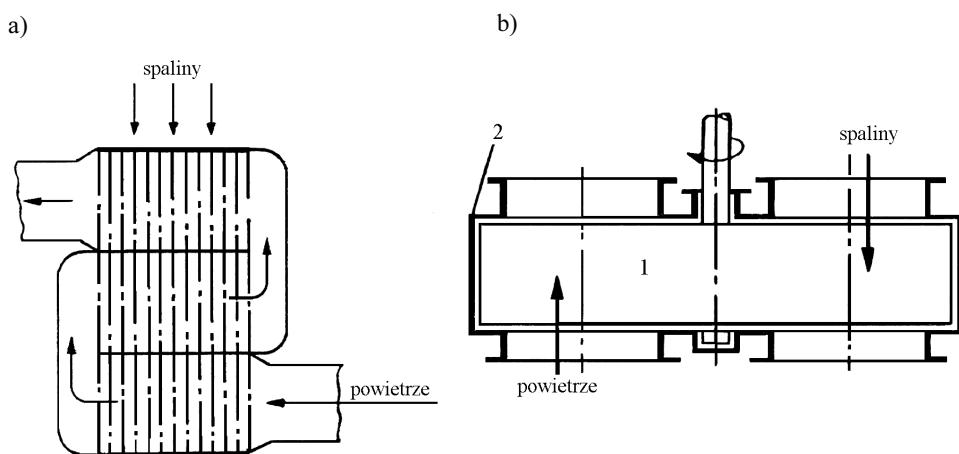
Dalsze wykorzystanie energii cieplnej spalin następuje przez zainstalowanie na drodze spalin podgrzewacza powietrza. Zastosowanie podgrzanego powietrza do spalania pyłu węglowego zwiększa stabilność płomienia pyłowego, a ponadto – podnosząc temperaturę spalania – intensyfikuje przekazywanie ciepła w kotle. Podgrzewacze powietrza dzieli się na:

- konwekcyjne,
- rekuperacyjno-regeneracyjne.

Na rysunku 8.30 przedstawiono schematycznie działanie obu typów podgrzewaczy. W podgrzewaczach konwekcyjnych przejmowanie ciepła od spalin do powietrza odbywa się przez powierzchnię dzielącą oba czynniki. Przykładem jest

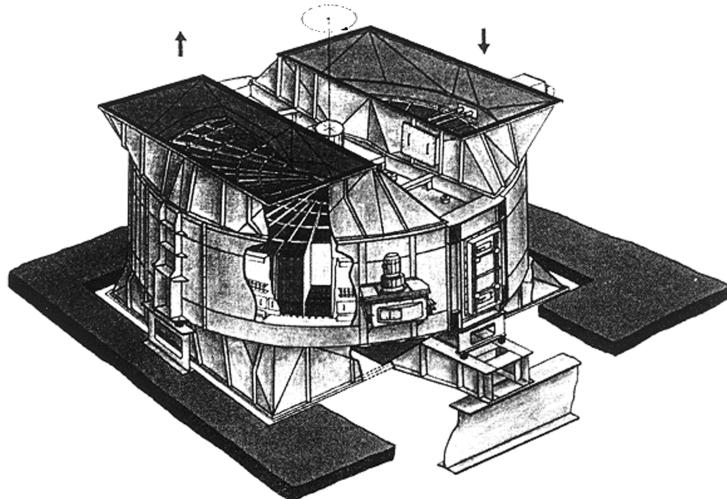
podgrzewacz rurowy zbudowany z rur przyspawanych do płyt – ścian sitowych [5]. Spaliny przepływają wewnątrz rur, powietrze natomiast omywa rury z zewnątrz w kierunku poprzecznym (rys. 8.30a). Tego typu podgrzewacz powietrza występuje w kotle pyłowym pokazanym na rysunku 8.5.

W obrotowych podgrzewaczach regeneracyjnych na wale jest osadzony wirnik z pakietami cienkich blach, który obraca się z prędkością obrotową 3–4 obr/min (rys. 8.30b). Przez jedną połowę wymiennika płyną spaliny ogrzewające blachy podgrzewacza, a po półobrocie wirnika ogrzane blachy przemieszczają się na drugą stronę kadłuba, przez którą płynie powietrze, ogrzewając się od nich. W ten sposób blachy podgrzewacza są kolejno ogrzewane i oziębiane. Budowę obrotowego podgrzewacza powietrza pokazano na rysunku 8.31.



Rys. 8.30. Zasady działania podgrzewaczy powietrza:  
a) rurowego, b) obrotowego: 1 – wirnik, 2 – osłona

W kotłach energetycznych o dużej wydajności z zasady stosuje się obrotowe podgrzewacze powietrza, ponieważ w stosunku do podgrzewaczy rurowych zajmują mniej miejsca i są bardziej niezawodne.



Rys. 8.31. Obrotowy podgrzewacz powietrza [7]

## Literatura

- [1] CWYNAR L., *Rozruch kotłów parowych*, WNT, Warszawa 1989.
- [2] GRANEK L., *Spalanie w cyrkulacyjnym złożu fluidalnym, kocioł CFB-670*, Elektrownia Turów, Mały Informator Techniczny, Bogatynia 2000.
- [3] KRUCZEK S., *Kotły, konstrukcje i obliczenia*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
- [4] *Mechanik. Poradnik techniczny*, t. IV, cz. 1, WNT, Warszawa 1954.
- [5] ORLOWSKI P. i in., *Kotły parowe*, WNT, Warszawa 1979.
- [6] *Poradnik termoenergetyka*, WNT, Warszawa 1974.
- [7] ŚMIEJA H. i in., *Obrotowe wymienniki ciepła produkcji RAFAKO S.A.*, Energetyka, nr 10, 1997, s. 516.
- [8] WRÓBLEWSKI T. i in., *Urządzenia kotłowe*, WNT, Warszawa 1973.
- [9] ZIELIŃSKI Z., *Maszyny i urządzenia cieplne i energetyczne*, PWSZ, Warszawa 1969.
- [10] ŹELKOWSKI J., *Kohleverbrennung. Brennstof, Physik und Theorie, Technik*, VGB Technische Vereinigung Der Grosskraftwerksbetrieber E.V., Essen 1986.