**Chłodziarki masy – od fluidyzacyjnych do wibrofluidyzacyjnych**

Aleksander Fedoryszyn[[1]](#footnote-1), Czesław Rudy[[2]](#footnote-2), Krzysztof Smyksy[[3]](#footnote-3)

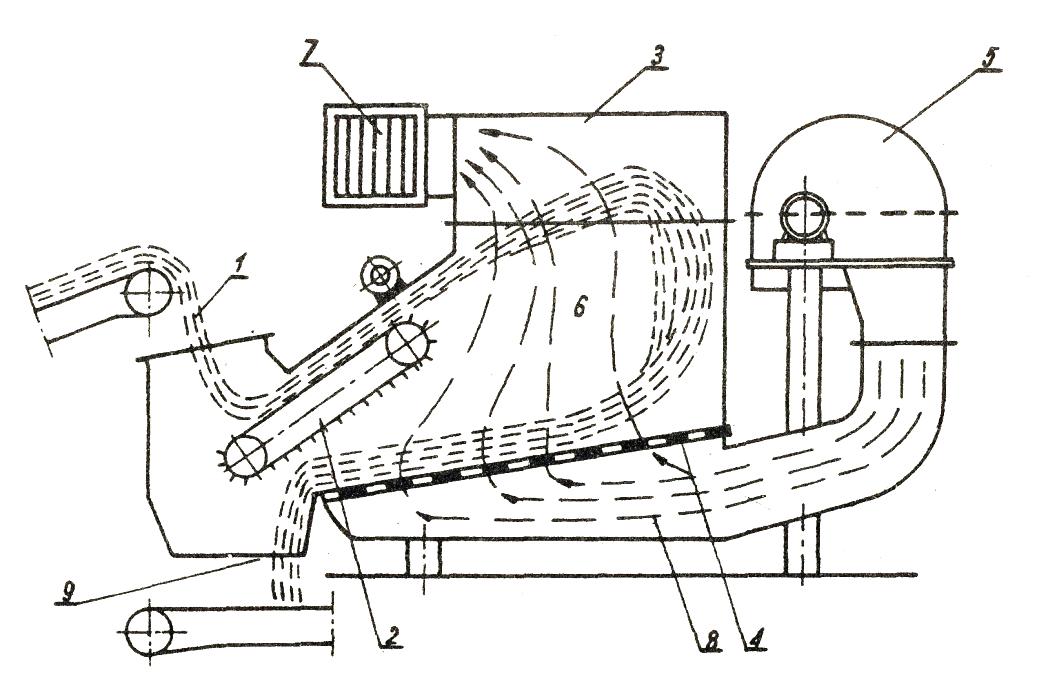
**Wprowadzenie**

Chłodzenie masy ma istotne znaczenie przy mechanizacji i automatyzacji procesu wytwarzania odlewów w formach piaskowych, wykonywanych z użyciem masy syntetycznej z bentonitem. Masa, której temperatura przekracza max.150C ponad temperaturę otoczenia musi być schłodzona.

Najefektywniejszym sposobem chłodzenia jest proces polegający na przedmuchiwaniu powietrzem nawilżonej masy. Zachodzące w wyniku tego procesu zmiany temperatur, zarówno powietrza jak i masy, zależą od względnej różnicy temperatur chłodzonej masy i powietrza oraz od początkowej ich wilgotności. Sposoby realizacji chłodzenia masy i rozwiązania chłodziarek omówiono w wielu opracowaniach [1÷7].

**Chłodziarki fluidyzacyjne**

Pierwsze chłodziarki krajowe, z których nieliczne eksploatowane są do dzisiaj w krajowych odlewniach, to rozwiązania chłodziarek typu CHM oraz ACHM oferowane przez Pemod Myślenice. Były to urządzenia pracujące w oparciu o zasadę fluidyzacji masy. Konstrukcję chłodziarek fluidyzacyjnych opracowano w PPiWO Prodlew O/Kraków.



*Rys.1. Schemat chłodziarki fluidyzacyjnej typu CHM-40: 1-zasyp masy, 2-podajnik taśmowy, 3-komora separacyjna, 4-perforowane dno chłodziarki, 5-wentylator podmuchowy, 6-komora chłodzenia, 7-odciąg powietrza, 8-kierownice rozdzielające strumień powietrza w komorze pneumatycznej, 9-wysyp masy*

W tych oryginalnych chłodziarkach powietrze chłodzące dwukrotnie przepływa przez strumień masy, wyrzucanej przez podajnik taśmowy 2. Wyrzucana masa spływa z tylnej ścianki komory chłodzenia na perforowane dno chłodziarki 4, dystrybutor powietrza. Powietrze, dostarczone przez wentylator 5, stanowi czynnik chłodzący, który przejmuje zawarte w masie ciepło. Szybkość przedmuchiwania jest dobierana w ten sposób, aby mogło nastąpić upłynnienie (sfluidyzowanie) warstwy masy sprzyjające intensyfikacji chłodzenia. Upłynniona masa przesuwa się do wylotu chłodziarki 9, a następnie jest transportowana do mieszarek celem odświeżenia.

Dane dotyczące omawianej chłodziarki masy CHM-40 zestawiono w tabeli 1; dane opracowano na podstawie prospektów ofertowych.

*Tabela 1*

*Parametry eksploatacyjne chłodziarki fluidyzacyjnej CHM - 40*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *Wielkość* | *Wymiar* | *Wartość* |
| Powierzchnia dystrybutora *B×L* | m2 | 3,4 |
| Pochylenie dystrybutora *β* | 0 | 8 |
| Wydajność *W* | m3, godz. | 40 |
| Temperatura masy początkowa *tp* | 0C | 65÷160 |
| Temperatura masy schłodzonej *tw* | 0C | 30÷80 |
| Wilgotność masy, *wp.max* | % | 4 |
| Ilość odciąganego powietrza *Vodc.* | m3/godz. | 21 000 |
| Moc zainstalowana *N* | kW | 22,2 |
| Gabaryty:   * szerokość, * wysokość, * długość | mm  mm  mm | 2800  2550  4415 |

Na rysunku 2 przedstawiono schemat chłodziarki z wirującym bębnem, wyposażonym w listwy umieszczone na jego obwodzie, wyrzucającym masę do komory roboczej. W tym przypadku miało miejsce bardzo intensywne rozbijanie i spulchnianie strumienia masy. Na rysunku tym przedstawiono również wartości z przykładowych obliczeń bilansowych [5]. Wartości parametrów przy wejściu i na wyjściu urządzenia przyjęto na podstawie serii pomiarów chłodziarki fluidyzacyjnej masy ACHM 25 o wydajności 25 Mg/godz., przy czym w chłodziarce tej nie wprowadzano strumienia wody uzupełniającej. Natężenie podawanego powietrza wynosiło 13 500 m3/godz. Temperatura powietrza przy wlocie wynosiła *t1* = 220C, a wilgotność względna *φ1* = 70%. Przy wylocie odnośne parametry wynosiły odpowiednio: *t2* = 280C, *φ1* = 95%. Pomierzone parametry masy obiegowej to: temperatura początkowa *tp* = 440C, temperatura końcowa *tk* = 280C, wilgotność początkowa *wp* = 2,5%, a wilgotność końcowa *wk* = 2,0%.

Dla powyższych danych wyznaczono udziały poszczególnych strumieni ciepła w stosunku do całkowitego strumienia; wartości udziałów przedstawiono na rysunku 2.



*Rys. 2. Schemat chłodziarki fluidyzacyjnej z bębnem rzutowym z przykładowymi wynikami obliczeń bilansu ciepła [5]*

Chłodzenie masy zachodzi w wyniku równoczesnego przebiegu wymiany ciepła pomiędzy przepływającym czynnikiem chłodzącym a masą. Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na efektywność chłodzenia jest odparowanie wilgoci znajdującej się w masie formierskiej. Obniżenie temperatury masy podczas chłodzenia jest w tym przypadku ściśle związane z wysoką wartością ciepła parowania wody. Wartość ta w zakresie temperatur 30 ÷ 1000C wynosi od 2427 ÷ 2257 kJ/kg. Dlatego też w chłodziarkach należy dodawać do masy formierskiej dodatkową ilość wody zwaną w bilansie cieplnym chłodziarek – strumieniem wody uzupełniającej.

**Chłodziarki wibrofluidyzacyjne**

W chłodziarkach wibrofluidyzacyjnych ma miejsce transport i fluidyzacja. Takie oddzielne oddziaływanie na masę ułatwia realizację jej chłodzenia (rys. 3). Poprzez zmiany parametrów drgań dystrybutora (amplitudy, częstotliwości i kierunku siły wymuszającej) możliwe jest sterowanie przepływem masy, niezależnie od wpływu podawanego powietrza na transport. Mając możliwość regulacji transportu masy wzdłuż dystrybutora możliwa jest optymalizacja efektów i dobór warunków chłodzenia tj. poprzez zmianę ilości podawanego powietrza oraz stopnia nawilżania masy.

****

*Rys. 3. Zestawienie parametrów wpływających na przebieg i efekty wibrofluidyzacyjnego chłodzenia masy*

Omawiane chłodziarki fluidyzacyjne i wibrofluidyzacyjne, stanowiące w istocie rynny transportowe, charakteryzują się wydajnością określoną zależnością:

, (1)

w której: *v* – prędkość liniowa strugi materiału wzdłuż powierzchni dna, odpowiednio rynny fluidyzacyjnej *vf* oraz wibrofluidyzacyjnej *vwf* w m/s,

*B,H* – wymiary warstwy, odpowiednio *BHf* i *BHwf* w m2,

*ρ* – gęstość warstwy nosiwa, odpowiednio podczas fluidyzacji *ρf* oraz wibrofluidyzacji *ρwf* w kg/m3.

Do zasadniczych czynników mających wpływ na przebieg procesu transportu wibrofluidalnego i wydajność należą:

* natężenie oddziaływania rozluźniającego warstwę, czyli intensywność przepływu powietrza - określona liczbą fluidyzacji *LF*, oraz intensywność drgań *kd = aω2/g* i ich kierunek *α*,
* natężenie zasilania masą *Apod*, determinujące wysokość warstwy *H*,
* kąt pochylenia dystrybutora (dna komory chłodziarki) *β*.

Prędkość przemieszczania się strugi materiału mieści się w szerokich granicach *vf*= 0.01÷0.43 m/s przy wysokościach warstwy *Hf* = 0.048÷0.19 m. Wartość średnia prędkości przemieszczania masy w urządzeniach wibrofluidyzacyjnych zwiększa się 1,5÷3 razy w porównaniu z wibracyjnymi.

Chłodzenie wibrofluidyzacyjne masy formierskiej było również przedmiotem badań prowadzonych przez zespół AGH. Efekty procesu chłodzenia wyznaczono w warunkach przemysłowych. Proces chłodzenia prowadzono przy użyciu chłodziarki prototypowej CWFM, konstrukcji PPP Technical Nowa Sól. Schemat i widok chłodziarki CWFM 3510 przedstawiono na rysunku 4. Parametry eksploatacyjne zestawiono natomiast w tabeli 2.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| *Rys. 4. Schemat i widok chłodziarki wibrofluidyzcyjnej: 1- komora robocza, 2- komora separacyjna, 3- wentylator podmuchowy, 4- dysze wodne, 5- dystrybutor powietrza*  *Fig. 4. Vibro-fluidised bed cooler: 1- operation chamber, 2- separation chamber, 3-pressure fan, 4-water nozzles, 5- air distributor* | |

*Tabela 2*

*Parametry eksploatacyjne chłodziarki wibrofluidyzacyjnej CWFM - 3510*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *Wielkość* | *Wymiar* | *Wartość* |
| Powierzchnia dystrybutora *B×L* | m2 | 3,5 |
| Wydajność *W* | t, godz. | 20÷30 |
| Temperatura masy początkowa *tp* | 0C | 120 |
| Temperatura masy schłodzonej *tw* | 0C | 15+totocz. |
| Wilgotność masy, *wp.max* | % | 0,5÷2 |
| Moc zainstalowana *N* | kW | 12,9 |
| Gabaryty:   * szerokość, * wysokość, * długość | mm  mm  mm | 1750  2650  4100 |

Strumień masy formierskiej, syntetycznej z bentonitem, chłodzonej w badanej chłodziarce CFM 3510 wynosił średnio= 5,56 kg/s (max. = 8,33 kg/s) przy wilgotności początkowej masy *w* = 0,5 ÷1,5 %.

Napęd rynny chłodziarki stanowiły 2 elektrowibratory (rys.4.), z możliwością zmiany położenia wirujących mas. Amplituda liniowa wynosiła *amax*=3,75 mm, prędkość obrotowa *n*=960 obr/min. Projektowa prędkość transportu nosiwa *v* = 0,1 ÷ 0,2 m/s.

Zasilanie w powietrze chłodzące zapewniał wentylator podmuchowy o wydajności *V*= 2,2, m3/s, przy obrotach *n* = 2940 obr/min, mocy *N* = 11 kW i sprężu *Δpc*=3150 Pa. Uzyskanie założonego podciśnienia w komorze roboczej zapewniało podłączenie do odciągu o *V*=2,55 m3/s i *Δpc*=3750 Pa.

Instalacja wodna składała się z 3 rzędów dysz podawania wody (rys.4). Ilość podawanej wody przez dyszę wynosiła 1,4 ÷ 2,4 l/min.

Wyniki badań procesu chłodzenia masy z użyciem chłodziarki CFM 3510 pozwoliły na weryfikację założeń projektowych, w tym obliczeń efektywności procesu wymiany ciepła i masy. Analiza danych pomiarowych polegała na obliczeniach bilansowych odpowiednich strumieni [3,4]:

, (2)

gdzie: , , - strumienie ciepła doprowadzone do chłodziarki z masą obiegową, powietrzem chłodzącym i wodą uzupełniającą,

, - strumienie ciepła odprowadzane z chłodziarki z ochłodzoną masą i powietrzem odlotowym,

- ciepło rozproszone do otoczenia.

Równanie (2) można przedstawić w następującej postaci:

, (3)

oraz w wersji uproszczonej, wprowadzając zapis :

(4)

gdzie: - strumień ciepła wymieniany przez chłodzoną masę formierską z powietrzem chłodzącym oraz otoczeniem,

- strumień ciepła związany ze zmianą entalpii powietrza chłodzącego.

Przykładowym wskaźnikiem, z wielu wyznaczonych [2÷4], jest wielkość określająca ilość masy ochłodzonej przez 1 kg powietrza. Na rysunku 5 zestawiono dane charakteryzujące pod tym względem serię prowadzonych doświadczeń oraz obliczenia. Wartość tego wskaźnika kształtowała się od 2,3 do 2,5 kg masy ochłodzonej przez 1 kg powietrza.



*Rys.5. Relacja pomiędzy ilością masy formierskiej ochłodzonej przez 1 kg powietrza, wyrażona ilorazem – qmf/qp, wydajnością chłodzenia wyrażoną przez wskaźnik – ΔQm/qp a efektami chłodzenia – Δt; qm – natężenie przepływu masy w kg/s, qp – natężenie przepływu powietrza w kg/s, Qm – ilość przepływu ciepła (od gorącej masy) w kJ/s*

*Fig.3. Relation between amount of moulding sand cooled by 1 kg of air expressed by the ratio – qmf/qp, efficiency of cooling air using expressed by the ratio – ΔQm/qp and cooling effect – Δt; qm - intensity of moulding sand flow in kg/s, qp – intensity of cooling air flow in kg/s, Qm – intensity of heat flow (received from hot sand) in kJ/s*

Zgromadzone w pracy [3] dane badawcze stanowiły podstawę opracowania odpowiednich algorytmów sterowania oraz doboru parametrów pracy chłodziarek wibrofluidyzacyjnych.

Aktualnie firma PPP Technical oferuje szereg chłodziarek wibrofluidyzacyjnych typu CFM (rys. 6) [8]. Wydajność chłodziarek jest uzależniona od szeregu parametrów konstrukcyjno – eksploatacyjnych, w tym szerokości dystrybutora powietrza (rys. 7).



*Rys. 6. Wydajność chłodziarek wibrofluidyzacyjnych, produkcji PPP Technical, w zależności od zakresu temperatur chłodzenia: 1- 1200C → 450C, 2- 1000C → 450C, 3- 800C → 450C*



*Rys. 7. Zestawienie parametrów pracy chłodziarek wibrofluidyzacyjnych typu CFM*

W chłodziarkach wibrofluidyzacyjnej prowadzone jest nawilżanie masy poprzez dysze natryskowe umieszczone we wnętrzu komory (vide rys.4.). Ilość podawanej wody jest sterowana w zależności od żądanych parametrów masy po schłodzeniu. W chłodziarkach CFM nawilżanie może być realizowane przez układ natryskowy, sterowany przez system  MICOMP UNI typ G-FBK firmy Michenfelder [8].

Właściwością urządzeń z warstwą upłynnionej, formierskiej masy obiegowej jest możliwość separacji zanieczyszczeń, zarówno metalowych jak i niemetalowych, w tym o wymiarach 1÷6 mm, tj. takich których udział w masie stanowi nawet 70 % [6]. Oryginalne rozwiązanie separatora wibroflidyzacyjnego przedstawiono na rysunku 8. W obudowie 1 tego urządzenia znajduje się, podwieszona na elementach sprężystych, rynna 2. Głównymi jej elementami są: dystrybutor powietrza 3, obrzeże 4 wykonane częściowo z blachy oraz siatki, komora powietrzna oraz wibratory 8. Doprowadzając powietrze do komory powietrznej powoduje jego przepływ przez dystrybutor 3, a dalej warstwę materiału. Przepływ strumienia powietrza o określonej prędkości, powoduje „upłynnienie” materiału warstwy. Wprowadzenie drgań rynny ułatwia ten proces wibrofluidyzacji. Wskutek ekspansji warstwy (zwiększenia jej wysokości) ziarna masy „przelewają się” przez stałe burty boczne, wykonane z blachy, oraz przechodzą przez oczka burty siatkowej, zsypując się do zbiornika 6. Zanieczyszczenia pozostające na dystrybutorze przemieszczane są do wysypu 7, dzięki ruchowi drgającemu rynny.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| *Rys. 8. Schemat separatora wibrofluidyzacyjnego: 1- obudowa, 2- rynna, 3- dystrybutor powietrza, 4- boczne burty rynny, 5- zanieczyszczenia, 6- zbiornik masy, 7- wysyp zanieczyszczeń, 8- wibratory* | *Rys. 9. Przykładowy bilans strumieni masy i zanieczyszczeń w separatorze wibrofluidyzacyjnym*  *Fig.9. Exemplary balance of moulding sand and impurities in vibrofluidised bed separator* |

Na rysunku 9 przedstawiono przykładowy bilans strumieni masy i zanieczyszczeń opracowany na podstawie wyników badań separatora przemysłowego zainstalowanego w odlewni staliwa [7]. Udział zanieczyszczeń w masie doprowadzonej do separatora wynosił 5,1%, końcowy udział w masie po separacji wyniósł natomiast 0,1 %. W wielu próbach przemysłowych wykazano, że skuteczność separacji zanieczyszczeń wynosi ponad 90%.

**Podsumowanie**

Analiza wyników i pomiary, przeprowadzone w warunkach przemysłowych, dostarczyły cennego materiału do weryfikacji założeń teoretycznych pracy chłodziarek fluidyzacyjnych i wibrofluidyzacyjnych. Wyniki prac stanowiły podstawę opracowania odpowiednich algorytmów sterowania oraz doboru parametrów pracy chłodziarek fluidyzacyjnych, a także wibrofluidyzacyjnych.

Upłynnienie złoża masy przez fluidyzację i wibrofluidyzację, a przez to rozwinięcie powierzchni kontaktu z powietrzem chłodzącym (czynnikiem fluidyzującym) stwarza optymalne warunki wymiany ciepła i masy. Procesowi upłynnienia masy towarzyszy rozdział składników złoża, wydzielenie zanieczyszczeń.

Aktualnie są eksploatowane przede wszystkim chłodziarki wibrofluidyzacyjne, których rozwiązania dają dużą możliwość sterowania przebiegiem pracy i uzyskiwanych efektów.

Oferowane chłodziarki wibrofluidyzacyjne charakteryzują się wystarczająco szerokim zakresem regulacji podstawowych parametrów pracy chłodziarki takich jak: intensywność drgań, kierunek siły wymuszającej, natężenie strumienia wody chłodzącej, natężenie strumienia powietrza chłodzącego, a także prędkości podawania masy. Stawarza to możliwość doboru optymalnego parametrów pracy urządzenia przy zróżnicowanych warunkach technologicznych i otoczenia.

**Literatura**

1. Dańko J., Fedoryszyn A.: *Urządzenia i systemy intensywnego chłodzenia masy formierskiej. The devices and systems for intensive of moulding sand cooling*. Archiwum Odlewnictwa, nr 1 (2/2), rocznik 1. Polska Akademia Nauk O/Katowice Komisja Odlewnictwa. Katowice, 2001, s. 432÷439.
2. Fedoryszyn A., Rudy C., Smyksy K.: *Racjonalizacja konstrukcji i eksploatacji urządzeń do przerobu masy formierskiej. The rationalization of construcion and operation of the equipment for the moulding sand preparation.* Archives of Metallurgy and Materials. Vol. 58, Issue 2. Polish Academy of Sciences. Warszawa – Kraków, 2013, s. 915
3. Fedoryszyn A., Smyksy K. i in.: *Opracowanie technologii przygotowania, chłodzenia wraz z separacją zanieczyszczeń oraz odświeżania obiegowej masy z bentonitem w zmechanizowanej produkcji odlewów żeliwnych*. Projekt celowy KBN nr 6 T08 137 2002 C/5600. Wydział Odlewnictwa AGH. Kraków, 2004
4. Fedoryszyn A., Smyksy K.: *Eksperymentalna weryfikacja charakterystyk procesu chłodzenia masy w złożu wibrofluidyzacyjnym*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji. Vol. 24, nr 3, Komisja Budowy Maszyn PAN O/Poznań. Wyd. Politechniki Poznańskiej. Poznań, 2004, s. 67÷75.
5. Sztefko F., Dańko J.: *Podstawy bilansu cieplnego współczesnych chłodziarek do obiegowych mas formierskich*. Przegląd Odlewnictwa, nr.6, 1976, s. 145.
6. Sztefko F.: *Analiza procesów przygotowania formierskiej masy używanej w aspekcie ich mechanizacji*. Zeszyty Naukowe AGH nr 139. Kraków, 1991. *Analysis of Return Sand Preparing Processes in the Aspect of their Mechanization*. Scientific Bulletins of Stanisław Staszic Academy of Mining and Metallurgy Bulletin 139. Cracow, 1991
7. Praca zbiorowa: *Badania diagnostyczne fluidyzacyjnej chłodziarki masy CHM-40-2*. *Badania separatora wibrofluidalnego zanieczyszczeń metalowych i niemetalowych Q = 40 m3/h*. Zleceniodawca: Przedsiębiorstwo Produkcji i Montażu Urządzeń Odlewniczych PEMOD- Myślenice. AGH. Kraków, 1979
8. Prospekt i strona internetowa firmy PPP TECHNICAL – *www.technical.com.pl*

1. Prof. dr hab. inż. Aleksander Fedoryszyn – Wydział Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie [↑](#footnote-ref-1)
2. Dr inż. Czesław Rudy – Przedsiębiorstwo Projektowo Produkcyjne PPP Technical w Nowej Soli [↑](#footnote-ref-2)
3. Dr inż. Krzysztof Smyksy - Wydział Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie [↑](#footnote-ref-3)