

Model zmian momentu obrotowego podczas granulacji bębnowej

Andrzej OBRANIAK – Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2012, 66, 5, 376-387

Wstęp

Z punktu widzenia procesu granulacji stopień wypełnienia oraz częstość obrotowa bębna powinny zapewniać ciągłość przesypanego się złoza, przy jednoczesnym wymuszeniu toczenia się powstających aglomeratów po powierzchni swobodnej. W takich warunkach, podczas obrotów bębna, złoże ziarniste znajdujące się wewnątrz aparatu jest zabierane w wyniku działania sił tarcia przez cylindryczną ściankę i podnoszone na pewną wysokość, przez co środek ciężkości złoza odchyła się od pionu o pewien kąt, a powierzchnia swobodna nachyla się o ten sam kąt do poziomu.

Kąt pochylenia powierzchni swobodnej złoza stanowi pewien wyznacznik stanu energetycznego. Przy braku poślizgu między sąsiednimi warstwami, ziarna znajdujące się przy ścianie wewnętrznej poruszają się [1] zgodnie z kierunkiem obrotu i w wyniku tarcia wewnętrznego wynoszą w górę kolejne warstwy złoza, których toru ruchu są fragmentami okręgów o coraz mniejszym promieniu. Powoduje to spadek prędkości obwodowych kolejnych warstw złoza. Tworzy się wówczas obszar, który w optymalnych warunkach pracy obejmuje połowę wsadu znajdującego się w bębnie i nazywany jest strefą podnoszenia. Po osiągnięciu najwyższego w danych warunkach położenia (położenia kąтового), ziarna mogą zachowywać się w różny sposób, w zależności od wartości dostarczanej do złoza energii. Najmniej korzystny przypadek polega na zjawisku ślizgania się całego złoza po ścianie wewnętrznej bębna, przy całkowitym braku cyrkulacji cząstek wsadu. Prędkość obwodowa ziaren przy ścianie aparatu – wartość, która także opisuje stopień przekazania energii – jest wówczas bliska zeru [2].

Korzystny dla procesu granulacji cykliczny ruch wsadu polega na tym, że ziarna znajdujące się przy ścianie aparatu wynoszone są do maksymalnej wysokości, po czym zaczynają się staczać lub zsuwać w dół po pochylonej powierzchni swobodnej złoza. Podczas podnoszenia warstwa ziaren stykająca się bezpośrednio ze ścianką aparatu porusza się wraz z nią, z prędkością obwodową równą prędkości obwodowej wewnętrznej powierzchni granulatora (wpływ przegród). Kolejne warstwy złoza ziarnistego znajdującego się w bębnie uzyskują energię potrzebną do ruchu w górę aparatu dzięki sile tarcia pomiędzy poszczególnymi ziarnami i warstwami materiału sypkiego. Przy dostatecznie dużej wartości współczynnika tarcia materiału sypkiego ich ruch do położenia maksymalnego odbywa się praktycznie bez poślizgu. Przemieszczanie promieniowe ziaren, a więc zmiana ich torów cyrkulacji jest możliwa w przypadku występowania gradientu prędkości cząstek w sąsiadujących warstwach. Może to nastąpić w obszarze, gdzie ziarna po uzyskaniu położenia maksymalnego staczają się lub zsuwają pod wpływem sił ciężkości. W związku z tym obszar ten jest nazywany strefą mieszania. Prędkości pojedynczych ziaren w strefie mieszania zależą od ich odległości od powierzchni swobodnej i posiadają składowe styczne do jej zarysu oraz promieniowe. Materiał znajdujący się w tej strefie jest zwykle nawilżany w celu zainicjowania i ułatwienia aglomeracji. Część ziaren złoza, po tym jak zastały wyniesione do położenia maksymalnego charakterystycznego dla swojej warstwy, nie przedostaje się do strefy mieszania, tylko cyркуluje dookoła pewnego centrum

cyrkulacji. Poruszają się one po stałych torach cyrkulacji nie mieszając się z innymi ziarnami, co utrudnia aglomerację tej części złoza. Tak utworzona strefa cyrkulacji jałowej nosi nazwę rdzenia [3]. Po osiągnięciu położenia dolnego, wszystkie ziarna i powstałe granulki zostają ponownie wyniesione do góry i omawiany cykl się powtarza, z uwzględnieniem zmian wielkości granulatu, co wynika z prowadzonego procesu. Reasumując, każdej cząstce materiału stanowiącego wypełnienie podczas wynoszenia jej do góry można przypisać pewien określony tor ruchu, zawierający się w płaszczyźnie prostopadłej do osi bębna. Tor ten dla większości ziaren kończy strefa mieszania, gdzie występuje nawilżanie i aglomeracja, zaś dla pozostałych jest on charakterystyczny dla całej ich cyrkulacji (linia zamknięta). Opisana cyrkulacja złoza występuje wówczas, gdy proces granulacji jest na tyle zaawansowany, że istotną część wsadu stanowi aglomerat. Na początku procesu, pył stanowiący złoże po podniesieniu odrywa się całą skarpią, na co wpływa wartość współczynnika tarcia przetwarzanego złoza o ściankę aparatu.

Ze względu na złożoność zagadnienia dotyczącego oddziaływania sił na ciało materialne, jakim jest materiał syпки znajdujący się w obracającym się poziomym bębnie, nie ma dotychczas opracowań, które zdołałyby całościowo rozwiązać omawiany problem przynajmniej dla jednego z realizowanych w takich aparatach procesów. W literaturze problemy dynamiki takiego układu najszerszej opracowano dla młynów kulowych. Zdecydowanie mniej jest prac dotyczących mieszania, a zwłaszcza granulacji.

Przy określaniu dynamiki układu złoza ziarnistego w obracającym się bębnie często rozpatrywano równowagę sił działających na podnoszone w aparacie złoże, traktując je jako ośrodek ciągły. Kantorowicz [4] analizując rozkład sił działających na ziarna w poziomym aparacie bębnowym wypełnionym materiałem sypkim, po wielu założeniach upraszczających uznał, że kąt pochylenia złoza równy jest kątowi naturalnego usypu. Koroticz [5] potwierdził te rozważania dla złoza ziarnistego znajdującego się w poziomym piecu obrotowym.

Analizując siły działające na ziarna złoza oraz ich prędkości, do opisu ich dynamiki stosowano takie parametry jak: kąt pochylenia złoza [1], prędkości ziaren [2], moment na wale bębna [6 ÷ 8], czy moc dostarczona [9].

Badania dotyczące modelowych materiałów ziarnistych (Heim i in.) [10] wykazały, że wartość momentu obrotowego mierzonego na wale zależy między innymi od prędkości kątowej i charakteru ruchu złoza. Stwierdzono dla wszystkich badanych materiałów, że wartość jednostkowego momentu obrotowego rośnie w badanym zakresie wraz z wzrostem prędkości obrotowej n do pewnej wartości maksymalnej, a następnie spada praktycznie do zera. Tendencja ta związana jest ze zjawiskiem wirowania złoza po przekroczeniu prędkości krytycznej. W przypadku niskich stopni wypełnienia ($k = 10\%$) siły bezwładnościowe, ze względu na małą masę wsadu, są zbyt małe, by doprowadzić do wirowania całego wypełnienia.

Powyższe rezultaty badań pozwoliły zaproponować wzór na wartość mocy przeznaczonej na ruch wsadu ziarnistego w aparacie bębnowym. Uzyskano następującą postać równania:

$$N = A \cdot n^{1.13} \cdot f^{0.20} \cdot k^{0.82} \cdot \rho^{1.07} \quad (1)$$

W normalnych warunkach pracy młyna kulowego [11], zmiana mocy jest ściśle związana z efektywnością mielenia, ze wzrostem mocy zwiększa się efektywność pracy aparatu. W związku z tym moc uznaje się za najważniejszy parametr projektowy. Do obliczania mocy i momentu obrotowego młynów bębnowych stosowane były zależności opierające się na: korelacjach empirycznych, zastosowaniu praw mechaniki do określenia toru lotu kul, potraktowaniu wsadu młyna jako ośrodka ciągłego. Klasyczne sposoby badania związków energetycznych dla młynów kulowych polegają na rozpatrywaniu równowagi złoża znajdującego się w bębnie, bądź opisie ruchu poszczególnych ziaren, grup ziaren, lub mielników. Dirge [12] analizując wartość momentu pochodzącego od sił ciężkości wyprowadził wzór na moc:

$$N = 14.5 \cdot 10^{-6} \cdot D^{2.5} \cdot L \cdot \rho \cdot V_w \cdot (100 - V_w) \cdot C \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

gdzie:

V_w – objętość wewnętrzna młyna

Stosowalność tej zależności jest ograniczona do prędkości młyna poniżej 75% prędkości krytycznej. W świetle późniejszych doświadczeń (także przemysłowych) wzór (2) został zmodyfikowany m.in. przez Rowlanda i Kjosa (1978) [13], Harrisa (1985) [14], Rowlanda [15], Mishra i Rajamani [16].

Rose i Sullivan [17] zastosowali do opisu analizę wymiarową, wprowadzając szeroki zakres zmiennych, zaś Gao [18] zaproponował wzór pozwalający na obliczenia mocy w podstawowym, klasycznym układzie SI postaci:

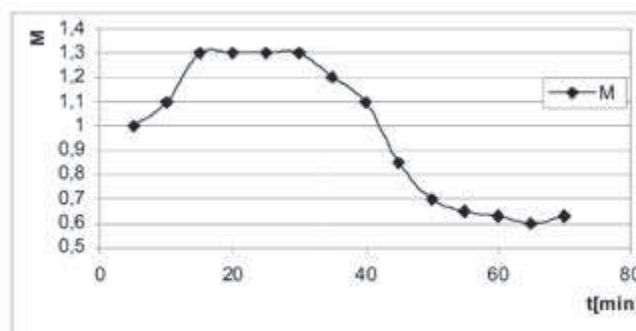
$$N = 7.36 \cdot 10^{-6} \cdot D^{2.3} \cdot L \cdot \rho \cdot V_w \cdot (100 - 0.937V) \cdot C \cdot \left(1 - \frac{0.1}{2^{9-0.1C}}\right) + 102 \cdot 10^{-6} \cdot L \cdot V_w \cdot \rho \cdot D^3 \cdot (1000 \cdot B_m - 2.5 \cdot D) \quad (3)$$

Ostatni człon równania uwzględnia wielkość mielnika B_m , zaś C – stała.

Sandvik [19] porównał zmiany mocy w czasie mielenia w młynach kulowych. W otrzymanych zależnościach stwierdził dwa maksima lokalne.

Inny sposób modelowania procesu zakłada, że wypełnienie młyna, to ośrodek ciągły, którego powierzchnia swobodna nachyla się podczas obrotów bębna, aż osiągnięta zostanie krytyczna wartość kąta pochylenia. Młyn pracuje wtedy w trybie kaskadowym, a moc zależy od wymiarów aparatu, jego prędkości obrotowej, stopnia napełnienia materiałem ziarnistym oraz od masy tego wypełnienia. Opierając się na powyższych założeniach, Hogg i Fuerstenau (1972) [20] obliczyli pracę potrzebną do podniesienia kul podczas ich drogi po okrężnych torach do pozycji najwyższej. Podobne wyniki uzyskali w modelu dźwigni Arbiter i Harris [21]. Porównali oni pracę pochodzącą od siły wynoszącej złoże ze stratami energii wywołanymi jego ciężarem.

W wielu pracach [22÷25] uznano, że podczas pracy młyna występuje mieszany ruch złoża, kataraktowo-kaskadowy. Wiąże się to ze zmianą w trakcie rozdrabniania własności materiału znajdującego się w aparacie, co wpływa na zmiany dynamiki złoża wraz z postępem procesu. Kapur [26] analizując pracę różnych młynów kulowych podał kilka rodzajów krzywych zależności momentu obrotowego od czasu. Charakterystyczną cechą tych zależności jest często występujący zakres stałości momentu obrotowego, który świadczy o ustaleniu się charakteru ruchu przetwarzanego złoża (cyrkulacja kaskadującego granulatu).



Rys. 1. Moment obrotowy młyna w funkcji czasu rozdrabniania

Wg Velamakanniego [27], zmiany momentu obrotowego w czasie prowadzenia procesu mają różny charakter w zależności od etapu rozdrabniania, co związane jest ze zmianą zachowania się wypełnienia młyna na skutek zmiany własności złoża. W obu przypadkach, po początkowym wzroście wartości momentu, ustaliła się jego wartość na stałym poziomie. Spadek wartości momentu zaobserwowany na wykresie zamieszczonym na Rysunku 1 opisującym mielenie na mokro spowodowany jest wirowaniem złoża, które „przykleiło się” do wewnętrznych ścianek młyna. Istnienie zakresu stałego momentu podczas mielenia na mokro potwierdziły też badania Heima i in. [28].

Kijama (1974) [29] badając dynamikę procesu mielenia w młynach kulowych uzależnił wartości momentu od prędkości obrotowej młyna i stopnia wypełnienia aparatu elementami mielącymi. Zauważył, że istotny wpływ na wartość momentu ma to, jak duża część wypełnienia porusza się ruchem kataraktowym, a jaka kaskadowym.

Podobne rozważania dotyczące mocy, momentu obrotowego i pozostałych parametrów opisujących dynamiczny stan złoża ziarnistego w obracającym się bębnie przeprowadzono dla procesu granulacji przesypowej [30, 31]. Opierając się na wynikach badań modelowych Heim i wsp. [10] określili odpowiednie zależności dla rzeczywistego materiału ziarnistego (bentonitu) podczas procesu mokrej granulacji bębnowej.

Pomiarów dokonano w całym cyklu granulacji dla dwóch wartości stopnia wypełnienia bębna materiałem ziarnistym k . Założono, że czas granulacji równa się czasowi nawilżania.

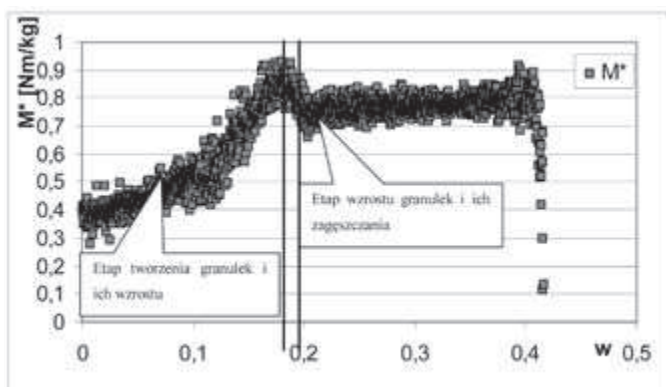
Jednostkowy (zredukowany) moment M^* był definiowany wzorem:

$$M^* = \frac{M - M_j}{m_s + m_w} \quad (4)$$

Uzyskane wyniki porównano z wykresem $M^* = f(t)$ uzyskanym podczas przesypania materiału suchego (proszku). W przypadku tym symulowano dostarczanie cieczy do układu poprzez ciągłe dosypywanie do bębna proszku o tej samej masie co ciecz zwilżająca. Porównanie uzyskanych wyników wyjaśnia, że przyczyną wzrostu momentu podczas granulacji nie jest przyrost masy wsadu spowodowany dostarczaniem cieczy, lecz zmiana charakteru jego ruchu spowodowana zwilżeniem proszku, a w konsekwencji jego aglomeracją. Występuje wówczas zmiana takich własności przetwarzanego złoża, jak: skład granulometryczny, gęstość nasypowa oraz kąt tarcia wewnętrznej i współczynnik tarcia zewnętrznej.

Zauważono wówczas, że podczas procesu granulacji w początkowej fazie następuje wzrost wartości momentu obrotowego, następnie jego wartość ustala się, by w końcu, w efekcie obklejania bębna przez przewilżony granulak, gwałtownie maleć. Wartości momentu są wtedy zależne od ilości wirującego z bębniem materiału.

Obraniak i Gluba [32] mierzyli chwilowe wartości momentu obrotowego w trakcie procesu granulacji. Przykładowy przebieg chwilowych wartości momentu zredukowanego w funkcji wilgotności przedstawiono na Rysunku 2.



Rys. 2. Zmiany momentu zredukowanego od wilgotności materiału

Analizując otrzymane wykresy wyszczególnili każdorazowo trzy zakresy różniące się charakterem przebiegu tych zależności. W pierwszym zakresie zależność momentu od wilgotności ma w przybliżeniu postać funkcji kwadratowej, w drugim zakresie obserwujemy krótkotrwały spadek jego wartości, a w trzecim można przyjąć jego stałość. Trzeci zakres kończy gwałtowny spadek wartości momentu spowodowany przywieraniem wsadu do ścianek bębna. Szczególnie interesujący jest początkowy wzrost momentu i jego późniejsze ustalenie. Ten charakter zmian momentu należy tłumaczyć zmianami parametrów charakteryzujących granulowane złożo podczas prowadzenia procesu. Uzyskany charakter zmian momentu jest jednoznacznie związany ze zmianami właściwości granulowanego złoża zachodzącymi w trakcie procesu. Zmianom ulega wówczas średnica granulek, gęstość nasypowa, porowatość oraz, na skutek dostarczania cieczy, masa całego złoża. Zauważono, że po osiągnięciu pewnej granicznej wartości nawilżenia złoża, dalsze doprowadzanie cieczy powoduje obniżenie wartości momentu obrotowego, a następnie obserwujemy jego utrzymywanie się na stałym poziomie. W okresie stałości również następują istotne zmiany właściwości granulowanego złoża, niepowodujące jednak zmian wartości momentu napędowego, co może być wynikiem wzajemnego redukowania się wpływu poszczególnych właściwości. Analiza otrzymanych wyników pozwala stwierdzić, że na wartość momentu w procesie granulacji w obrotowym bębnie podczas nawilżania złoża wpływ mają takie parametry aparaturowo-procesowe, jak: stopień wypełnienia bębna i jego prędkość obrotowa.

Cel pracy i zakres badań

Celem pracy było zaproponowanie oraz weryfikacja modelu zmian momentu obrotowego podczas granulacji bębnowej.

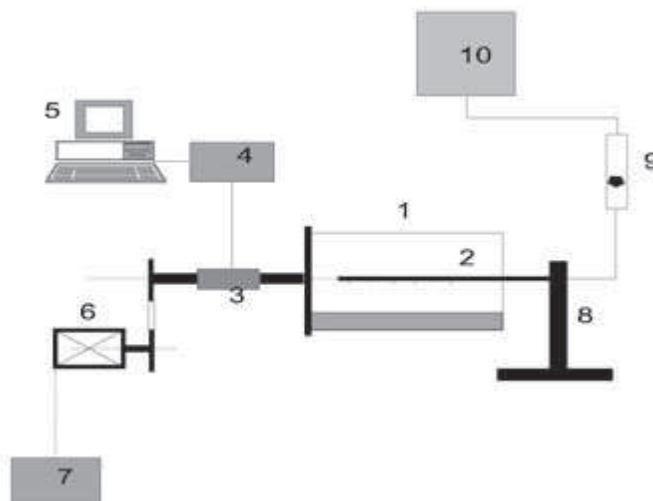
W czasie badań stosowano następujące zakresy zmian parametrów:

- średnica bębna granulatora $D = 0,40$ m
- wypełnienie aparatu złożem ziarnistym $k = 5\%-20\%$
- prędkość kątowa bębna; $\omega = 1,41-2,64$ rad/s.

Aparatura i metodyka pomiarów

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na Rysunku 3. Bęben (1) napędzany był motoreduktorem (6) za pośrednictwem przekładni pasowej i sprzęgła. Płynną zmianę prędkości obrotowej bębna uzyskiwano za pomocą falownika (7), a jej kontrolę przeprowadzano przy użyciu obrotomierza. Chwilowe wartości momentu obrotowego mierzono momentomierzem (3) i poprzez czytnik (4) przetwarzano oraz rejestrowano w komputerze (5). Umieszczone w bębnie złożo ziarniste nawilżano kropłowo za pomocą zraszacza (2), wprowadzonego osiowo do wnętrza aparatu i zapewniającego równomierne dostarczanie cieczy na całej długości bębna. Zraszacz zamocowano na niezależnym od granulatora statywie (8). Ciecz zwilżająca (woda destylowana) była podawana ze zbiornika (10), umieszczonego na wysokości 2,5 m od osi bębna, a jej stałe natężenie przepływu

($Q = 1 \cdot 10^{-6}$ m³/s) kontrolowano za pomocą rotametu (9). Przez cały czas próby utrzymywano stały poziom cieczy w zbiorniku, co zapewniało stałe ciśnienie podawanej cieczy. Złożo ziarniste nawilżano aż do przewilżenia materiału powodującego jego oblepienie na ścianie wewnętrznej granulatora. Co 120 s pobierano próbkę i mierzono jej gęstość nasypową, kąt naturalnego usypu oraz kąt tarcia złoża o powierzchnię wewnętrzną aparatu, po czym zwracano do bębna. Proces granulacji prowadzono w sposób okresowy, każdorazowo przy ustalonych parametrach procesowo-aparaturowych: stopniu wypełnienia bębna i prędkości obrotowej granulatora.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego

1 – bęben granulatora; 2 – zwiłżacz; 3 – momentomierz; 4 – czytnik; 5 – komputer 6 – silnik; 7 – falownik; 8 – statyw; 9 – rotametr; 10 – zbiornik z wodą

Model

Przy podnoszeniu ziaren złoża w warunkach równowagi kinematyczno-dynamicznej (Rys. 4), tzn. gdy w wyniku obrotu bębna środek ciężkości wypełnienia ziarnistego podnosi się do położenia scharakteryzowanego przez kąt β_0 , można wyróżnić przedstawione na Rysunku 4 siły działające na złożo traktowane jako ciało sztywne.

Są to siły: ciężkości i odśrodkowa (przyłożone w środku ciężkości złoża) oraz siła normalna oddziaływania ścianki aparatu na złożo i siła tarcia (których wypadkowe przyłożono w połowie łuku będącego linią kontaktu złoża i ścianki bębna).

Taka analiza układu sił sprowadza się więc do następujących sił skupionych (wypadkowych):

- siła ciężkości

$$G = m \cdot g \quad (a)$$

- siła odśrodkowa

$$F_{od} = m \cdot \omega^2 \cdot R_0 \quad (b)$$

- siła oddziaływania ścianki na złożo

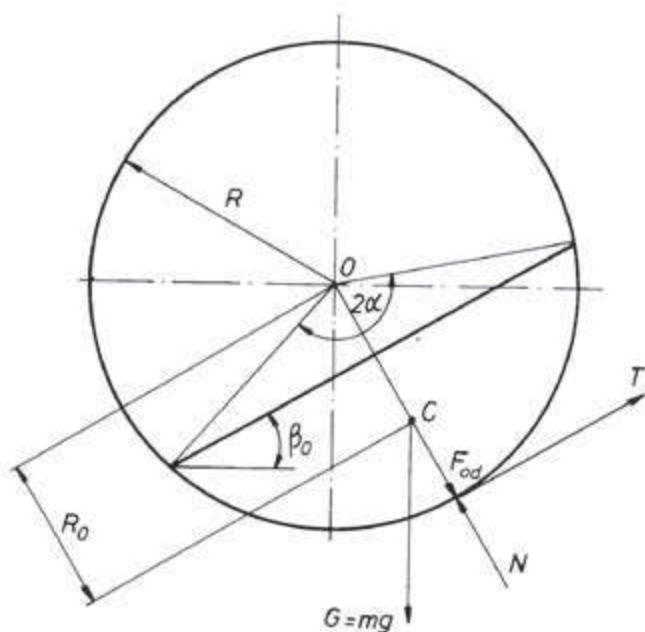
$$N = m \cdot g \cdot \cos \beta_0 + m \cdot \omega^2 \cdot R_0 \quad (c)$$

- siła tarcia

$$T = f(m \cdot g \cdot \cos \beta_0 + m \cdot \omega^2 \cdot R_0) \quad (d)$$

gdzie:

$$R_0 = \frac{4}{3} \cdot R \cdot \frac{\sin^3 \alpha}{2\alpha - \sin 2\alpha} \quad (e)$$



Rys. 4. Siły działające na granulowane złożo

Przy założeniu, że układ (złożo ziarniste) podczas wynoszenia do pozycji określonej przez kąt β_0 zachowuje się jak ciało sztywne można wnioskować, że będzie w równowadze, gdy suma momentów działających na nie będzie równa zero. Potwierdza to równanie momentów względem punktu O.

$$M_T - M_G = 0 \quad (f)$$

Moment sił tarcia można opisać wzorem:

$$M_T = T \cdot R \quad (g)$$

Moment pochodzący od składowej siły ciężkości powodującej zsuwanie złoża można obliczyć z zależności:

$$M_G = mg \cdot \sin \beta_0 \cdot R_0 \quad (h)$$

Momenty od siły tarcia oraz od siły ciężkości zależą od wielu czynników.

Podstawiając zależność (6.4.) do wzoru (6.7.) mamy:

$$M_T = R \cdot f(mg \cdot \cos \beta_0 + m\omega^2 \cdot R_0) = R \cdot f \cdot m \cdot (g \cdot \cos \beta_0 + \omega^2 \cdot R_0) \quad (i)$$

Masę m granulowanego złoża można przedstawić jako:

$$m = \pi \cdot R^2 \cdot L \cdot k \cdot \rho \quad (j)$$

gdzie:

$$k = \frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{2\pi} \quad (k)$$

Po odpowiednich podstawieniach, moment pochodzący od sił tarcia można obliczyć ze wzoru:

$$M_T = R \cdot f(g \cos \beta_0 + \omega^2 R \frac{\sin^3 \alpha}{2\alpha - \sin 2\alpha}) \cdot 0.5 \cdot R^2 (2\alpha - \sin 2\alpha) \cdot L \cdot \rho \quad (l)$$

$$M_T = 0.5R^3 f \cdot L \cdot \rho [g \cos \beta_0 (2\alpha - \sin 2\alpha) + \frac{4}{3} \omega^2 R \sin^3 \alpha] \quad (m)$$

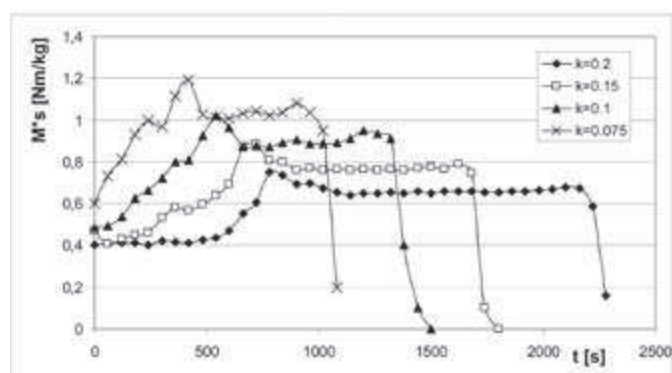
Rozpatrując moment pochodzący od sił ciężkości mamy:

$$M_G = m \cdot g \sin \beta_0 \cdot R_0 \quad (n)$$

$$M_G = 0.5R^2 (2\alpha - \sin 2\alpha) L \rho \cdot g \sin \beta_0 \cdot \frac{4}{3} \cdot R \cdot \frac{\sin^3 \alpha}{2\alpha - \sin 2\alpha} \quad (o)$$

Wyniki badań

Dla każdej z przeprowadzonych prób granulacji uzyskano charakter zmian momentu obrotowego wraz z postępem procesu zgodny z wynikami prac Heima [8] i Obraniaka [32]. W celu zwiększenia czytelności prezentowanych wyników postanowiono uzyskane rezultaty pomiaru momentu obrotowego przedstawić jako średnie liczone z 60 kolejnych punktów pomiarowych. Ze względu na różne masy przetwarzanego złoża w różnych próbach postanowiono porównać wartości momentu przeliczonego na jednostkę masy wsadu. Przykładowe porównanie zmian momentu obrotowego zredukowanego (wg zależności (4)) przedstawiono na Rysunku 5.



Rys. 5. Porównanie zmian momentów obrotowych dla różnych stopni wypełnienia bębna materiałem ziarnistym

W pracy dokonano porównania modelowych zależności teoretycznych z wartościami momentu M^*s uzyskanego z pomiarów momentomierzem zainstalowanym na wale granulatora. Uzyskane wartości teoretyczne liczone z wzoru (4). Do określenia zmian momentu wykorzystano następujące zależności modelowe:

M^*t – zależność (m), jako wartość współczynnika tarcia przyjęto współczynnik tarcia wewnętrzznego obliczonego jako tangens kąta naturalnego usypu granulowanego złoża dla określonego czasu trwania procesu.

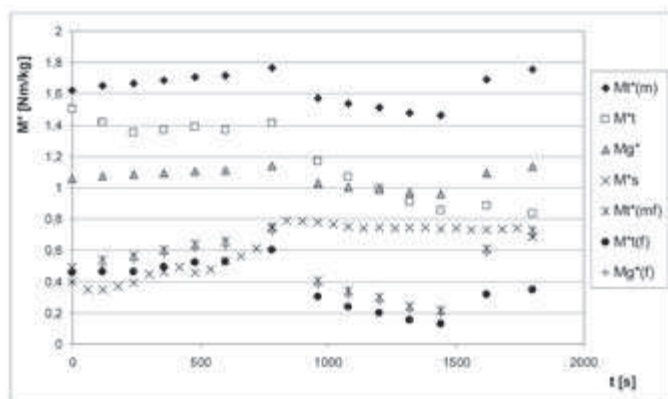
$M^*t(m)$ – zależność (i), jako wartość współczynnika tarcia przyjęto współczynnik tarcia wewnętrzznego obliczonego jako tangens kąta naturalnego usypu granulowanego złoża dla określonego czasu trwania procesu.

Mg^* – zależność (o), jako wartość współczynnika tarcia przyjęto współczynnik tarcia wewnętrzznego obliczonego jako tangens kąta naturalnego usypu granulowanego złoża dla określonego czasu trwania procesu.

$M^*t(f)$ – zależność (m), jako wartość współczynnika tarcia przyjęto współczynnik tarcia zewnętrznego złoża o ściankę bębna mierzonego dla określonego czasu trwania procesu.

$M^*_t(mf)$ – zależność (i), jako wartość współczynnika tarcia przyjęto współczynnik tarcia zewnętrznego złoza o ściankę bębna mierzonego dla określonego czasu trwania procesu.

$M^*_g(f)$ – zależność (o), jako wartość współczynnika tarcia przyjęto współczynnik tarcia zewnętrznego złoza o ściankę bębna mierzonego dla określonego czasu trwania procesu.



Rys. 6. Porównanie teoretycznych i rzeczywistych wartości momentu zredukowanego

Analiza uzyskanych zależności uwidacznia, że żadna z proponowanych zależności modelowych nie przybliża w dostatecznym stopniu uzyskanych wartości rzeczywistych dla całego czasu trwania procesu.

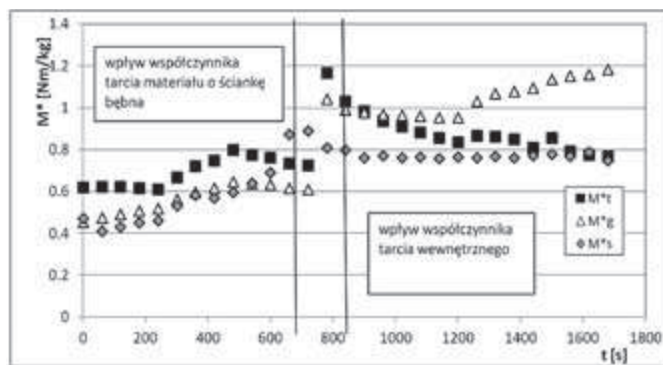
Związane jest to prawdopodobnie z różnicami w „zachowaniu” się przetwarzanego złoza ziarnistego w różnych etapach granulacji. Wynika to z postępu procesu, który skutkuje tworzeniem się i wzrostem granul, a tym samym zmianami we właściwościach granulowanego wsadu ziarnistego. Badania literaturowe i obserwacje pozwalają zauważyć różnice w charakterze ruchu cyrkulującego w poziomym aparacie bębnowym wypełnienia, wynikające ze zmian takich parametrów złoza, jak: gęstość nasypowa, współczynnik tarcia czy kąt naturalnego usypu. Materiał sypki, będący w całości granulem, cyrkuluje płynnie po podniesieniu złoza o kąt, który można utożsamiać z kątem naturalnego usypu. Natomiast na początku procesu, gdy większość wsadu stanowi niezgranulowany materiał, często obserwowanym zjawiskiem jest „odrywanie się” całej skarpy granulowanego złoza od ścianki wewnętrznej złoza, co świadczy o znacznym wpływie na proces współczynnika tarcia materiału ziarnistego o ściankę wewnętrzną (poboczną) aparatu.

Analizując zależności przedstawione na Rysunku 6 można zauważyć, że choć żadna z zaproponowanych zależności nie opisuje zmian wartości momentu dla całego czasu trwania procesu, to w poszczególnych przedziałach czasowych, tożsamy ze zdefiniowanymi [32] zakresami granulacji, wyniki modelowe z wystarczającą dokładnością przybliżają wartości rzeczywiste.

W pracy postanowiono zaproponować model, który uwzględniałby omówione powyżej zjawiska i dla kolejnych charakterystycznych etapów procesu uwzględniał różne współczynniki tarcia.

Dla etapu początkowego, związanego z nukleacją oraz z tworzeniem aglomeratów w wyniku nawarstwiania, przyjęto w zaproponowanych zależnościach modelowych współczynnik tarcia złoza o materiał aparatu, zaś w etapie polegającym na wzroście utworzonego uprzednio granulatu i jego zagęszczaniu w wyniku wzajemnych oddziaływań granul i ścianek przyjęto współczynnik obliczony na podstawie pomiaru kąta naturalnego usypu. Uzyskane wyniki zaprezentowano na Rysunku 7.

Można stwierdzić, że oba teoretyczne modele zmian momentu obrotowego (M^*_g , $M^*_t(f)$) można wykorzystać do oszacowania zmian momentu obrotowego podczas granulacji bębnowej. Podczas etapu początkowego wyniki rzeczywiste lepiej przybliża model M^*_g wykorzystujący zależność (o), natomiast w końcowym okresie procesu bliższe rzeczywistym wynikom pomiarów są wartości $M^*_t(f)$, obliczone z zależności (m).



Rys. 7. Porównanie wartości teoretycznych i rzeczywistych zredukowanego momentu obrotowego

Wnioski

1. Ze względu na złożony charakter ruchu granulowanego złoza w różnych okresach procesu, nie można zmian momentu obrotowego przybliżyć jedną uniwersalną zależnością.
2. Zależności teoretyczne na obliczanie momentu od sił tarcia oraz od sił ciężkości mogą służyć do szacowania zmian momentu obrotowego przy uwzględnieniu właściwego współczynnika tarcia dla różnych etapów procesu.
3. W wypadku, gdy wymagana jest duża zgodność wyników teoretycznych z prognozowanymi zmianami parametrów dynamicznych złoza, należy równania teoretyczne uzupełnić o współczynniki korygujące.

Symbolne

- A – stała
- D – średnica bębna
- L – długość bębna
- M^* – moment zredukowany
- N – moc
- R – promień bębna
- R_0 – odległość środka ciężkości złoza ziarnistego od osi bębna
- V – objętość bębna
- V_w – objętość wewnętrzna młyna
- f – współczynnik tarcia
- g – przyspieszenie ziemskie
- k – współczynnik wypełnienia bębna materiałem
- m – masa złoza
- n – prędkość obrotowa
- t – czas trwania operacji
- 2α – kąt środkowy
- kąt pochylenia złoza
- ρ – gęstość nasypowa
- częstość kątowna

Literatura

4. Heim A., Gluba T., Kochański B., Obraniak A., Załuga T.: *Kształt przekroju poprzecznego warstwy ziarnistej w bębnie obrotowym*. Inż. Chem. i Proc. 1995, **1**, 95-116.
5. Heim A., Gluba T., Obraniak A.: *Prędkość ziaren w warstwie przysiennej bębna obrotowego*. Inżynieria Chemiczna i Procesowa 1997, **18**, 1, 133-141.
6. Rudgers R.: *Longitudinal mixing of granular material flowing through a rotating cylinder*. I. Chem. Eng. Sci. 1965, **20**, 12, 1079-1087.
7. Kantowicz Z.B.: *Maszyny przemysłu chemicznego*. PWT, Warszawa 1959.
8. Koroticz W.I.: *Dwizenije sypucziewo matieriala wo wraszczajuszczemsa barabanie*. Stal 1961, **8**, 680-686.
9. Mellmann J.: *The transverse motion of solids in rotating cylinders – forms of motion and transition behavior*. Powder Technol. 2001, **118**, 251-270.
10. Heim A., Gluba T., Obraniak A.: *Ruch złoza ziarnistego w poziomym granulatorze bębnowym*. Zeszyty Naukowe PŁ. Inżynieria Chemiczna 1997, **21**, 779, 77-84.

11. Heim A., Gluba T., Obraniak A.: *Badania momentu obrotowego podczas granulacji bębnowej*. XXXVI Seminarium Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii 1999, 49-62.
12. Gluba T., Heim A., Kochański B., Obraniak A., Zająca T.: *Badania dynamiki wsadu ziarnistego w obrotowym bębnie*. XV Ogólnopolska Konferencja Naukowa Inżynierii Chemicznej i Procesowej Gdańsk 1995, tom I.
13. Heim A., Gluba T., Obraniak A.: *Zapotrzebowanie mocy do napędu granuladora bębnowego*. V Ogólnopolskie Sympozjum GRANULACJA, Puławy 1995.
14. Olejnik T.P.: *Milling kinetics of chosen rock materials under dry conditions considering strength and statistical properties of bed*. Physicochemical Problems of Mineral Processing 2011, **46**, 145-154.
15. Dirge M., Sandvik K.L.: *Mineralteknikk*. NTH, Trondheim 1990 and earlier editions back to 1968 (In Norwegian).
16. Rowland C.A., Kijos D.M.: *Rod and ball mills*. In: A.L. Mular, R.B. Bhappu (Editors). Mineral Processing Plant Design. AIME, New York 1978, 239-278.
17. Harris C.C., Schnock E.M., Arbiter N.: *Grinding mill power consumption*. Miner. Process. Technol. Rev. 1985, **1**, 297-345.
18. Rowland C.A.: *Diameter factors affecting ball mill scale-up*. Int. Miner. Process. 1988, **22**, 95-104.
19. Mischra B.K., Rajamani R.K.: *Numerical simulation of charge motion in a ball mill*. In: K. Sjoenert (Editor). 7-th European Symposium on Comminution. Preprints, Part 2. Fakulteta za Noravoslovje in Tehnologijo-Vtozd Montanistika Ljubljana 1990, Askerceiva 20, 555-563.
20. Rose H.E., Sullivan R.M.E.: *Treatise on the Internal Mechanics of Ball. Tube and Rod Mills*. Chemical Publishing Co., New York 1958.
21. Gao M.W.: *Optimization scaleup and simulation of tumbling mills*. Thesis. Luella University of Technology, April 1990.
22. Sandvik K.L.: *Design criteria for large mills partly based upon the experiences with the Sydvaranger ball mill*. LES TECHNIQUES, Decembre 1992, 29-33.
23. Hogg R., Fuerstenau D.W.: *1972. Power relationships for tumbling mills*. Trans. SME-AIME, **252**, 418-423.
24. Arbiter N., Harris C.C.: *Skale-up and dynamics of large grinding mills – a case study*. In: A.L. Mular and G.V. Jergensen II (Editors). Design and Installation of Comminution Circuits. AIME, New York 1982, Ch. 26, 491-508.
25. Fuerstenau D.W., Venkatarman K.S., Velamakanni B.V.: *Effect of chemical additives on the dynamics of grinding media in wet ball mill grinding*. Int. J. Miner. Process. 1985, **15**, 251-267.
26. Fuerstenau D.W., Kapur P.C., Velamakanni B.V.: *A multi-torque model for the effects of dispersants and slurry viscosity on ball milling*. Int. J. Miner. Process. 1990, **28**, 81-98.
27. Hogg R., Fuerstenau D.W.: *Power relationships for tumbling mills*. Trans. SME-AIME 1972, **252**, 418-423.
28. Pietsch W.: *Wet grinding experiments in a torque ball mill*. In: H. Rumpf, K. Schonert (Editors), Zerkleiner. Deschema-Monographien Nr. 1292-1326, Band 69, Part 2, Verlag Chemie, Weinheim 1972, 751-779.
29. Kapur P.C., Ranjan S., Fuerstenau D.W.: *A cascade-cataract charge flow model for power draft of tumbling mills*. Int. J. of Min. Proc. 1992, 9-29.
30. Velamakanni B.: *Ph.D. thesis*. College of Engineering. University of California, Berkeley 1988.
31. Heim A., Solecki M., Obraniak A.: *Ocena procesu mielenia organicznej frakcji odpadów komunalnych w młynie bębnowym*. Zeszyty Naukowe PŁ. Inżynieria Chemiczna 1999, **26**, 221-228.
32. Kiyama H., Majima H., Fujinaka Y.: *Driving power of tumbling mills*. Can. Min. Met. Bull. 1974, 1-9.
33. Gluba T.: *The energy of bed processing during drum granulation*. Chem. Eng. and Proc. 2005, **44**, 237-243.
34. Gluba T.: *The effect of wetting liquid droplet size on the growth of agglomerates during wet drum granulation*. Powder Tech 2003, **130**, 219-234.
35. Obraniak A., Gluba T.: *Model of energy consumption in the range of nucleation and granule growth in drum granulation of bentonite*. Physicochem. Probl. Miner. Process. 2012, **48** (1), 121-128.

Praca wykonana w ramach działalności statutowej **W-10/16/2012/Dz.St.** na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej.

Dr inż. Andrzej OBRANIAK ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej (1989). W 2002 r. uzyskał tytuł doktora na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska na tej samej uczelni. Obecnie jest pracownikiem naukowym w Katedrze Aparatury Procesowej Politechniki Łódzkiej.

IV Europejski Kongres Gospodarczy 14-16 maja 2012 r. Katowice

Trwają ostatnie ustalenia związane z konstruowaniem agendy Kongresu. Wstępny zakres tematyczny dostępny jest na: <http://www.eecpoland.eu/agenda/>. Organizatorzy zapraszają do konsultacji oraz do zapoznania się z agendą.

IV Europejski Kongres Gospodarczy to:

- Największa impreza biznesowa w Europie Środkowej
- Miejsce dialogu o kształcie europejskiej gospodarki w najbliższych latach
- Ponad 6000 uczestników
- Największe postaci polityki, biznesu, nauki
- Trzy dni obrad, około 100 paneli, spotkania biznesowe i kuluarowe, bankiety
- Znamienici goście z Polski i z zagranicy

Partnerzy i sponsorzy IV Europejskiego Kongresu Gospodarczego: www.eecpoland.eu/partnerzy

Szczegółowy plan Kongresu oraz lista prelegentów już wkrótce w portalu:
www.eecpoland.eu

Już teraz wszyscy zainteresowani mogą zgłosić chęć udziału w Kongresie, wypełniając formularz rejestracyjny: www.ptwp.pl/eec

Organizator:

Grupa PTWP SA
Katowice Business Point
ul. Piotra Ściegiennego 3
40-114 Katowice
Tel. +48 32 209 13 03

