

PROCESY TECHNOLOGICZNE PROWADZONE W APARATACH BĘBNOWYCH DLA MATERIAŁÓW ZIARNISTYCH

INDUSTRIAL BRANCHES CARRIED OUT IN THE ROTARY DRUMS FOR GRANULAR MATERIALS

Karolina Skoczowska

Politechnika Opolska

Wydział Mechaniczny

Katedra Inżynierii Środowiska

ul. St. Mikołajczyka 5

45-271 Opole

e-mail: k.skoczowska@doktorant.po.edu.pl

Abstract: Rotary drums are used in many industrial branches, such as: mixing, grinding, granulating, sieving and drying of granular materials. The widespread use of rotary drums is due to their simple design and operating principle - a rotating drum moving bed. But for the processes described in the paper a proper movement of the bed is different. The first move appears at the lower velocity, so the bed only slips. The second appears when the angle-of-repose is achieved and particles start rolling. During the next move, which is cascading, the so-called "kidney" is created. Particles are stationary in the central kidney but on the outside they circulate. While velocity still increases, the bed loosens up and particles start an autonomous move, that is cataracting. The last move characteristic to the bed is centrifuging. The bed swirls around the drum perimeters, which is when gravitation and centrifugal forces are balanced.

Keywords: rotary drum, grinding, mixing, screening, drying, granulation.

Wprowadzenie

Materiał ziarnisty to układ składający się z ziaren, czyli rozproszonego ośrodka ciała stałego, który ograniczony jest zamkniętą powierzchnią o pewnym kształcie. Jak łatwo można zauważyć, nazwa wzięła się z rolnictwa, gdzie stosuje się ją w nazewnictwie nasion roślin, w przemyśle jednak ziarno oznacza cząstkę ciała stałego pochodzenia zarówno naturalnego (zboża, kruszywa), jak i sztucznego (perlit) [1].

Złoże ziarniste ma pewne charakterystyczne cechy, które ważne są ze względu na prowadzone procesy. Jednym z ważniejszych jest ich zdolność do płynięcia, co przejawia się występowaniem tarcia wewnętrznego – materiały ziarniste mają parametr ten różny od 0. Dodatkowo ziarna mają zdolność przenoszenia naprężeń ścinających i zachowują swój kształt [2].

Parametrami opisującymi charakter złoża jest m.in.: kształt i średnica ziaren, porowatość, gęstość nasypowa, współczynnik tarcia wewnętrznego oraz wilgotność. Parametry te najprościej zdefiniować w przypadku złoża monodispersyjnego o cząstkach kulistych:

- Czynnikiem kształtu dla ziaren kulistych równy jest 1, w przypadku cząstek nieregularnych nie jest on wartością stałą i większy jest od jedności.

- Średnica ziaren dla regularnych cząstek jest łatwa w zdefiniowaniu, w innym przypadku najczęściej stosuje się średnicę zastępczą sita przez które przechodzą ziarna podczas procesu wytrąsania.

- Porowatość określana jest jako stosunek objętości wolnych przestrzeni do całej objętości jaką zajmuje materiał. W tym przypadku również najprostszym w zdefiniowaniu jest układ monodispersyjny złożony z cząstek kulistych, dla którego

porowatość złoza przy największym upakowaniu wynosi 0,259.

- Gęstość nasypowa określana jest jako stosunek masy luźno upakowanego materiału do jego objętości. Pomiędzy porowatością, a gęstością usypową istnieje więc pewna zależność.

- Współczynnik tarcia w materiałach ziarnistych wyrażany jest jako tangens kąta tarcia wewnętrznego, który mieści się zazwyczaj w granicach od 30° do 40°.

- Wilgotność złoza ma wpływ na procesy zachodzące podczas pracy aparatów bębnowych, przy czym należy rozróżnić sposób jej występowania. Znaczna wilgotność może doprowadzić do formowania nowych wiązań adhezyjnych i mostkowych, czego skutkiem może być aglomeracja cząstek. W przypadku, gdy woda związana jest krystalicznie lub gdy jest ona wypełnieniem kapilar, materiał zachowuje się w podobny sposób jak w przypadku suchego układu [3].

Opis zagadnienia

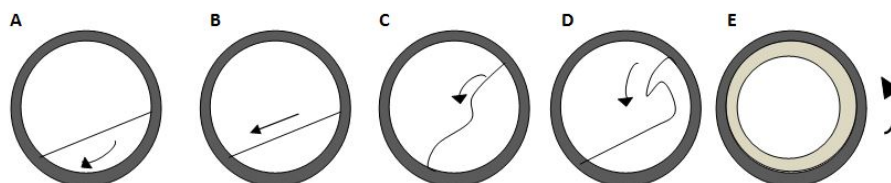
Aparaty bębnowe stosowane są w wielu procesach przemysłowych (rys. 1). Niesłabnące zainteresowanie tego typu urządzeniami wynika

z ich prostej budowy i zasady działania. W zależności od rodzaju mechanizmu urządzenia te mogą się od siebie różnić. Ich cechą wspólną jest jednak obracający się bęben, który wypełniany jest materiałem ziarnistym. Ruch bębna powoduje zmianę położenia złoza, które w zależności od prędkości obrotowych może zachowywać się w różny sposób (rys. 2). Dla wszystkich tych procesów odpowiedni ruch wypełnienia jest kluczowy dla optymalizacji procesów [4].

Poślizg złoza występuje przy bardzo niskich prędkościach obrotowych, podczas których złoże zostaje zabrane wraz z obracającym się bębniem, jednak nie osiąga tzw. kąta zsypania (rys. 2A), a po jego przekroczeniu następuje staczanie się cząstek po zwartym złożu (rys. 2B). Wraz ze wzrostem prędkości z jaką bęben się obraca, materiał tworzy charakterystyczną nerkę, w której rdzeń jest nie ruchomy, a jedynie zewnętrzna część porusza się cyrkulując dookoła środka złoza (rys. 2C). W czasie trwania kataraktowania cząstki opadają swobodnie na złoże i toczą się w dół (rys. 2D). Po przekroczeniu prędkości krytycznej, w czasie której rozpoczyna się wirowanie cząstek wraz z bębniem (rys. 2E) [4].



Rys. 1. Zastosowanie aparatów bębnowych w procesach przemysłowych.



Rys. 2. A) poślizg, B) toczenie, C) kaskadowanie, D) kataraktowanie, E) wirowanie.

Prędkość krytyczna (wzór 1) jest jednym z najważniejszych parametrów, które należy wyznaczyć w czasie projektowania procesów zachodzących w aparatach bębnowych. W zależności od prowadzonego mechanizmu optymalna prędkość będzie różna, lecz zawsze odniesiona do danego parametru.

$$n_{kr} = 42,3 \cdot D^{-0,5} \quad (1)$$

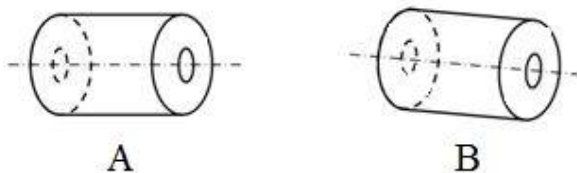
gdzie:

D - średnica bębna [m].

Mieszanie

Mieszanie jest procesem mającym na celu ujednoczenie danego układu. W przypadku materiałów ziarnistych odbywa się to dzięki chaotycznej zmianie położenia cząstek dzięki ich wzajemnym ruchom. Proces ten jest ważnym elementem w wielu gałęziach przemysłu: energetycznego, ceramicznego, wydobywczego, farmaceutycznego oraz rolno-spożywczego [3].

Proces mieszania w aparatach bębnowych następuje na skutek zmiany położenia ziaren mieszaniny - tzw. mieszanie dyfuzyjne. Występuje ono równocześnie w kierunku do osi i do promienia aparatu bębnowego. Mieszanie materiałów ziarnistych najczęściej prowadzone jest w aparatach bębnowych o osi obrotu poziomej (rys. 3a) lub ustawionych pod niewielkim kątem - ok 4-10% (rys. 3b). W drugim przypadku możliwy jest ciągły odbiór mieszaniny, który ulega przemieszczeniu pod wpływem zmienionego kąta osi symetrii. Na proces zmieszania wpływ ma przede wszystkim prędkość obrotowa bębna i jego średnica oraz rodzaj wypełnienia. Określono również wpływ długości bębna na zmieszanie - proces zachodzi szybciej i dokładniej w mieszalnikach o krótszej komorze [4, 5].



Ryc. 3. Mieszalnik bębnowy: A) pozioma oś obrotów, B) ustawiony pod kątem.

W celu określenia stopnia zmieszania określa się jego stopień wg wzoru (2) lub (3). Przy braku zmieszania $M=1$, natomiast dla zmieszania idealnego $M=0$. idealny stopień zmieszania odzwierciedla stan uporządkowany, w którym w każdej próbce ilość składników jest taka sama. W rzeczywistości stan ten nie jest możliwy do osiągnięcia [4].

$$M = 1 - (\sigma_r \cdot \sigma_{ro}^{-1}) \quad (2)$$

gdzie:

σ_r - średnie odchylenie próbki [-],

σ_{ro} - odchylenie dla układu niezmięszanego [-].

$$M = 1 - e^{-k\tau} \quad (3)$$

gdzie:

k - stała szybkości mieszania [s^{-1}],

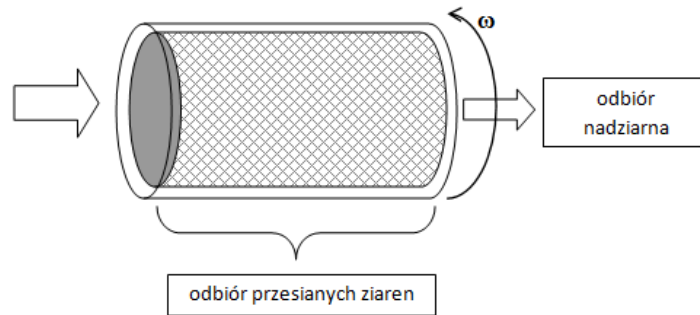
τ - czas trwania procesu [s].

Aby umożliwić zmieszanie materiałów ziarnistych w mieszalniku bębnowym należy doprowadzić do jego kataraktowania. Przy zbyt niskiej prędkości obrotowej - kaskadowanie,

ziarna znajdujące się wewnątrz tworzą zwartą nerkę, w której nie wykonują one żadnego ruchu, a w zewnętrznej warstwie zachodzi jedynie ich cyrkulacja. W przypadku, gdy wypełnienie osiąga tzw. stan równowagi - cząstki opadają poza złożę na ścianę bębna, również rozpoczyna się proces cyrkulacji, a proces mieszania zanika [3].

Przesiewanie

Przesiewanie jest procesem mającym na celu oddzielenie od siebie frakcji o różnym uziarnieniu, poprzez kontakt z sitem o określonej wielkości oczek. Proces prowadzony jest w urządzeniach, których boczne ściany tworzą sita, przez które ziarna o średnicy mniejszej od wielkości oczek ulegają przesianiu (rys. 4). Przesiewanie materiałów ziarnistych w aparatach bębnowych stosuje się do rozdzielania m.in. kruszyw i surowców skalnych, zarówno mokrych jak i suchych.



Rys. 4. Przesiewacz bębnowy.

Największą wadą aparatów bębnowych w porównaniu z innymi typami przesiewaczy (sita płaskie) jest znacznie mniejszy udział powierzchni czynnej sita - ok 20%, przy czym średnica bębna waha się od 500 do 3000 mm. Wpływa to na wydajność tego typu urządzeń, która mieści się w granicy 40-60% [6, 7].

Proces przesiewania prowadzi się zazwyczaj przy niskich prędkościach obrotowych - 30-40% prędkości krytycznej, która odpowiada procesowi toczenia lub kaskadowania. Dla zintensyfikowania kontaktu wszystkich ziaren z powierzchnią sita należy doprowadzić złożę do kataraktowania, co odpowiada 80-90% prędkości krytycznej. Możliwe jest ograniczenie prędkości obrotowej przesiewacza dzięki zastosowaniu elementów podnoszących ziarna na pewną wysokość, która umożliwi im swobodny spadek. Zazwyczaj montuje się od 6 do 8 progów. Zabieg ten nie jest konieczny w przypadku zastosowania graniastosłupa zamiast klasycznego bębna. Przesiewacze mogą być usytuowane pod niewielkim kątem - od 0 do 14°, co ułatwia wyładunek frakcji nadziarnowej [1, 6, 7].

Przesiewacze tego typu mają również zastosowanie w procesie wzbogacania, odwadniania oraz płukania materiałów ziarnistych.

Wydajność przesiewaczy bębnowych można obliczyć ze wzoru:

$$Q = 0,72 \cdot \mu \cdot \gamma \cdot n \cdot \text{tg}(2\alpha) \cdot (R^3 \cdot h^3)^{0,5} \quad (4)$$

gdzie:

μ - współczynnik spulchniania, przyjmuje się z przedziału: 0,6-0,8 [-],

γ - gęstość [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

n - prędkość obrotowa bębna [$\text{obr} \cdot \text{min}^{-1}$],

α - kat tarcia zewnętrznego materiału [°],

R - promień przesiewacza [m],

h - wysokość warstwy złoża w bębnie [m].

Rozdrabnianie

Proces rozdrabniania materiałów ziarnistych ma na celu zmniejszenie średnic cząstek danego układu poprzez działanie sił zewnętrznych. Najczęściej proces ten znajduje zastosowanie w przemyśle cementowym, farmaceutycznym, metalurgicznym, energetycznym oraz spożywczym.

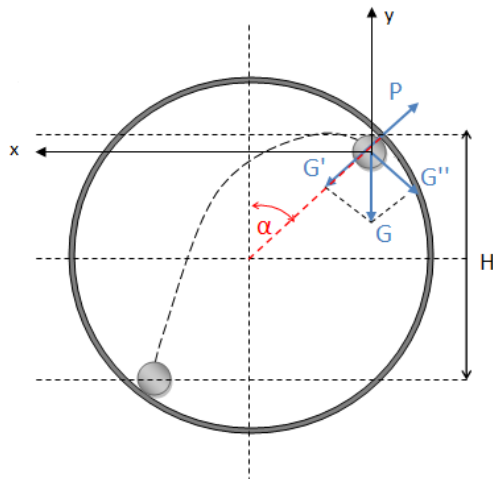
Ziarna posiadają pewną odporność na ściskanie, ścieranie, ścinanie zginanie i uderzenia, w zależności od siły i rodzaju wiązań międzycząsteczkowych. Twardość materiału ma więc znaczący wpływ na proces wybór urządzeń rozdrabniających - im jest wyższa tym ziarna bardziej odporne na ścieranie i ściskanie, lecz odwrotnie na uderzenia.

Aparaty bębnowe stosowane w procesie rozdrabniania nazywamy młynami. Ze względu na prędkości kątową zaliczane są do młynów wolnobieżnych, których zasada działania opiera się o grawitację. Jednymi z najbardziej znanych tego typu urządzeniami są młyny kulowe, w których rozdrabnianie następuje na skutek działania sił z jaką opadają one na materiał rozdrabniany. Dodatkowo w czasie trwania procesu występują także siły ścierające oraz wzajemnych zderzeń cząstek, które prowadzą do powstania naprężeń i zmian w strukturze, a po przekroczeniu ich granicznych wartości ziarna ulegają rozpadowi. W młynach kulowych, których stosunek długości do średnicy bębna nie przekracza 2, mielniki posiadają jednakowe wymiary. W przypadku urządzeń dłuższych możliwe jest zastosowanie różnych średnic kul mających za zadanie rozbicie nadawy. W takim przypadku kule o różnej średnicy oddzielone są przegrodami [8].

Proces rozdrabniania w młynach kulowych zachodzi najintensywniej w czasie, gdy kule

opadają z najdłuższą trajektorią ruchu, a następnie opadają na złożę. Siła z jaką mieliwo uderza o wypełnienie młynów jest wtedy największa. Najodpowiedniejszym ruchem złoża dla procesu rozdrabniania w tego typu

urządzeniach jest więc kataraktowanie. Ruch pojedynczej kuli przedstawiono na rys. 5, przy czym największa energia kinetyczna opadającej kuli odpowiada wysokości H [8, 9].



Rys. 5. Ruch kuli w młynie bębnowym, wg [9].

Na podstawie rysunku można określić optymalne obroty młyna kulowego, dla którego trajektoria ruchu mielnika jest najefektywniejsza ze względu na proces rozdrabniania:

$$n_{op} = 0,537 \cdot (D - d_k)^{-0,5} \quad (5)$$

Biorąc pod uwagę, że prędkości krytyczna dla kąta oderwania się kuli wynosi:

$$n_{kr} = 0,706 \cdot (D - d_k)^{-0,5} \quad (6)$$

Można przyjąć, iż najodpowiedniejsza prędkość obrotowa młyna kulowego powinna być równa:

$$n_{op} = 0,75 \cdot n_{kr} \quad (7)$$

gdzie:

d_k - średnica kuli [m].

Prędkość obrotowa stosowana w technologii młynów kulowych wynosi więc 65-80% prędkości krytycznej. Należy jednak podkreślić, że wyliczenia te przeprowadzane są dla pojedynczej kuli, gdzie nie zachodzą interakcje pomiędzy cząstkami wypełnienia [8, 9].

Mielność wypełnienia w aparatach bębnowych wg Bonda oblicza się ze wzoru:

$$W_i = 17,6 \cdot (0,01 \cdot \gamma)^{0,5} \cdot G^{-0,82} \quad (8)$$

gdzie:

γ - wielkość oczek sita kontrolnego [μm],

G - masa powstałego zmielonego materiału w czasie pojedynczego obrotu bębna [kg].

Odpowiednio do obliczenia zużycia energii w czasie procesu rozdrabniania w młynie kulowym:

$$W = 10 \cdot W_i (d_{80}^{-0,5} - D_{80}^{-0,5}) \quad (9)$$

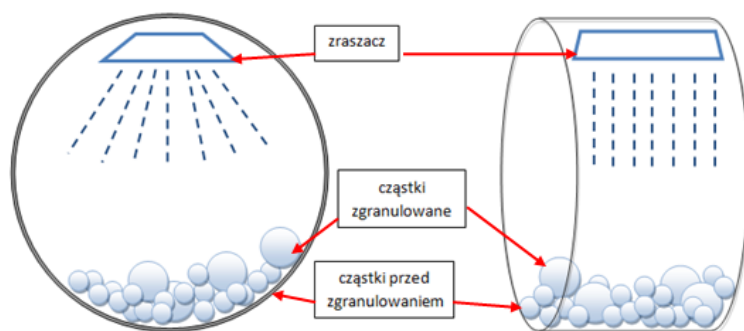
gdzie:

d_{80} - średnica dla 80% ziaren przesianych przez sito [μm],

D_{80} - średnica nadawy dla 80% cząstek [μm].

Granulowanie

Granulacja jest procesem mającym na celu uzyskanie układu złożonego z większych niż nadawa średnic cząstek, poprzez aglomerację wypełnienia (rys. 6). Proces ten zachodzi na skutek występowania sił adhezji oraz napięcia powierzchniowego i kapilarnego cieczy. Najczęściej celem jest otrzymanie cząstek o regularnych kształtach oraz przybliżonych parametrach mechanicznych. Granulacja ma przede wszystkim zastosowanie w transporcie (zwiększenie gęstości usypowej) oraz wszędzie tam gdzie pylenie materiałów utrudnia powadzenie procesów (wyeliminowanie małych cząstek, brak pylenia). Granulacja wpływa także na stałość materiału - brak rozdziału składników. Proces ten ma duże znaczenie w prawidłowym procesie przetwórstwa rud żelaza oraz wytwarzania nawozów [4].



Rys. 6. Proces granulacji w aparacie bębnowym.

Proces granulacji w aparatach bębnowych stosuje się dla materiałów wilgotnych, zachodzi więc reakcja pomiędzy ziarnami, cieczą i powietrzem. Proces jest więc zależny od parametrów tych trzech składników i ich wzajemnych zależności. Stopień zawilgocenia materiału ma istotny wpływ na jakość produktu końcowego. Wiele przeprowadzonych badań wykazało, że wraz ze wzrostem tego parametru uzyskuje się nowe cząstki o większej wytrzymałości mechanicznej oraz większych wymiarach - średnica ziaren rośnie proporcjonalnie do ilości kropelek cieczy rozpylanych w aparacie. Podobny wpływ ma czas prowadzenia procesu [10].

Ze względu na charakter procesu należy prowadzić granulację przy niskich prędkościach obrotowych bębna - proces aglomeracji zachodzi na zewnętrznej powierzchni swobodnej cząstek. Najodpowiedniejszym ruchem dla złoża w czasie granulowania jest więc falowanie i toczenie, odpowiadające 5-10% prędkości krytycznej [4, 8].

Dodatkowo podczas granulacji w aparatach bębnowych można przeprowadzić proces otoczkowania. Polega on na powleczeniu ziaren warstwą zwaną otoczką. Proces ten stosuje się w przemyśle rolniczo-spożywczym oraz farmaceutycznym. Zastosowanie warstwy wierzchniej ma za zadanie m.in. przedłużyć trwałość produktu oraz uniemożliwić koagulację ziaren. Podczas tego procesu stosuje się często podgrzewanie - utrzymanie płynnej struktury materiału powlekającego oraz chłodzenie produktu końcowego - szybsze utwardzenie otoczki. W procesie otoczkowania z procesami termicznymi, zmienia się nieco konstrukcja powłok granulatora bębnowego poprzez zastosowanie odpowiedniego płaszcza [11].]

Suszenie

Proces suszenia prowadzony jest w celu wyeliminowania lub zmniejszenia ilości wody w danym ośrodku stałym poprzez transport masy i ciepła. W procesach spożywczo-rolniczych proces ten ma za zadanie przedłużyć trwałość oraz utrwalić materiał. Dzięki zmniejszeniu wilgotności ziaren, czy produktów spożywczych zmniejsza się prawdopodobieństwo i szybkość powstawania drobnoustrojów, które mają zgubny wpływ na ich żywotność. Dodatkowo wilgoć w ziarnach naturalnych może powodować ich aglomerację. Proces suszenia jest więc istotnym procesem w przemyśle: farmaceutycznym, chemicznym i rolno-spożywczym [12, 13].

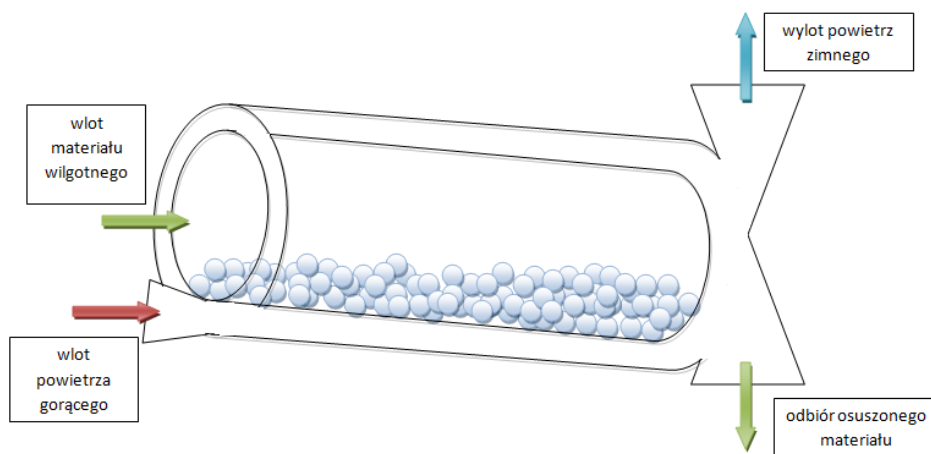
Proces suszenia najczęściej prowadzony jest w suszarkach komorowych, taśmowych oraz bębnowych (rys. 7). Ostatnie z nich wykorzystują konwekcję oraz przewodzenie ciepła, w celu zmniejszenia wilgotności materiału, podczas obrotów bębna. Dzięki obrotom suszarki materiał ulega wynoszeniu i opadaniu ziaren, a tym samym również ich zmieszaniu, co pozytywnie wpływa na proces suszenia. Najodpowiedniejszym więc ruchem wypełnienia jest początek kataraktowania, podczas którego opadające cząstki omywane są w całości przez gorący strumień przepływającego przeciwnie do powietrza. Należy jednak wziąć pod uwagę, iż zbyt wysoka prędkość obrotowa może spowodować rozpad materiałów suszonych, co może być niepożądane dla wielu procesów przemysłowych, w takich przypadkach optymalne będzie prowadzenie procesu podczas kaskadowania złoża. Innym sposobem wyeliminowania rozdrabniania materiałów jest zastosowanie tzw. półek wynoszących, dzięki którym proces suszenia prowadzony jest przy niższych prędkościach obrotowych, co dodatkowo korzystny wpływa pozytywnie na

energochłonność procesu. Suszarki bębnowe można więc, w zależności od ich konstrukcji, podzielić na urządzenia: przeponowe - kontaktowe, bezprzeponowe - konwekcyjne oraz suszarki z żaluzjami [12, 13]. Załadowność bębna, która jest jednym z ważniejszych parametrów opisujących proces suszenia można wyliczyć ze wzoru:

$$\kappa = V_{m,śr} \cdot V^{-1} \quad (10)$$

gdzie:

$V_{m,śr}$ - średnia objętość materiału suszonego [m³],
 V - objętość bębna [m³].



Ryc. 7. Suszarka bębnowa o procesie ciągłym.

Podsumowanie

W procesach przemysłowych mieszania, rozdrabniania, granulowania, przesiewania oraz suszenia materiałów ziarnistych stosowane są aparaty bębnowe. Szerokie zastosowanie tego

typu urządzeń związane jest z ich prostą konstrukcją i zasadą działania - obracający się bęben podnosi materiał na wysokość, która ściśle związana jest z prędkością obrotową - od poślizgu, poprzez toczenie, kaskadowanie, kataraktowanie, aż do wirowania całego złoża.

Literatura

1. Feder, S., Kęska, W., Włodarczyk, K., Pneumatyczne wspomaganie procesu przesiewania mieszanin ziarnistych na przesiewaczu płaskim, *Inżynieria Rolnicza*, 2008, 4 (102), s. 263-270.
2. Stręk, F., Mieszanie i mieszalniki. WNT, Warszawa, 1971.
3. Boss, J., Mieszanie materiałów ziarnistych, Wrocław, 1987.
4. Heim, A., Gluba, T., Obraniak, A., Badanie momentu obrotowego podczas granulacji bębnowej, *XXXVI Seminarium Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii*, 1999, s. 49-62.
5. Kolasa-Więcek, A., Wpływ długości i średnicy mieszalnika na stopień zmieszania materiałów sypkich, *Inżynieria Rolnicza*, 2007, nr 6(94), s. 81-87.
6. Wodziński, P., Przesiewanie kruszyw w przesiewaczach bębnowych, *Surowce i maszyny budowlane*, 2007, nr 1, s. 54-57.
7. Modrzewski, R., Wodziński, P., Koncepcja przesiewaczy bębnowo-stożkowych o zróżnicowanych średnicach sit do przesiewania kruszyw, *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej* nr 136, *Studia i Materiały* nr 43, Wrocław, 2013, s. 131-140.
8. Warych, J., Aparatura chemiczna i procesowa. Wyd. PW, Warszawa, 1996.
9. Battaglia, A., Banaszewski, T., Maszyny do przesiewania i rozdrabniania. Maszyny do przeróbki węgla, rud i surowców mineralnych, cz. I, Warszawa/Kraków, 1972.

10. Obraniak, A., Gluba, T., Wpływ parametrów strugi nawilżającej na kinetykę procesu bębnowej granulacji nawozu wieloskładnikowego, *Inżynieria i aparatura chemiczna*, 2010, nr 1, s. 79-80.
11. Sobczak, P., Zawislak, K., Panasiewicz, M., Wpływ procesu otoczkowania na wybrane właściwości fizyczne otrzymanych produktów, *Inżynieria Rolnicza*, 2009, 2(111), s. 161-168.
13. Ademiluyi, F., Abowei, M., Puyate, Y., Achinewhu, S., Effects of drying parameters on heat transfer during drying of fermented ground cassava in a rotary dryer, *Drying Technology*, 2010, No. 28, pp. 550-561.
12. Boruch, M., Nowakowska, K., *Technologia spożywczych suszów ziemniaczanych*. Wyd. II. Łódź, 1996.

*Praca współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego
„Stypendia doktoranckie - inwestycja w kadrę naukową województwa opolskiego”*