

Pomiar momentu obrotowego jako kryterium realizacji procesu granulacji talerzowej.

Torque measurement as a criterion for the implementation of the disc granulation process.

Andrzej Rostocki¹, Katarzyna Ławińska², Remigiusz Modrzewski¹, Roman Hejft³, Bogdan Derbiszewski⁴, Andrzej Obraniak^{1*}

¹ Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka,

² Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Przemysłu Skórzanego,

³ Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku, Politechnika Białostocka,

⁴ Wydział Politechniczny, Akademia Kaliska

Abstrakt

W pracy badano zmiany momentu obrotowego podczas granulacji drobnego materiału (bentonitu odlewniczego) w granulatorach talerzowych przy zmieniających się parametrach procesowych i aparaturowych. Złoże materiału sypkiego natryskiwano w trakcie dozowania, przy stałym natężeniu przepływu cieczy $Q=0,5 \cdot 10^{-3}$ dm³/s za pomocą zraszacza, który zapewniał równomierne podawanie cieczy natryskowej. Proces granulacji prowadzono każdorazowo aż do całkowitego zwilżenia materiału w aparacie. Przez cały czas trwania procesu rejestrowano chwilowe wartości momentu obrotowego na wale granulatora. Momenty jednostkowe (zredukowane) M^* (na jednostkę masy nasypowej) wyznaczono na podstawie zmierzonych wartości, uwzględniając moment jałowy oraz zmiany masy nasypowej w talerzu. Stwierdzono, że parametry procesu i aparatury miały istotny wpływ na funkcję $M^* = f(t)$. Wiąże się to ze zmieniającymi się właściwościami zwilżonego złoża i granulatu, od których zależy charakter ruchu złoża, a co za tym idzie moment niezbędny do pochylenia złoża i wywołania jego cyrkulacji niezbędnej do wywołania mechanizmów tworzenia i wzrostu aglomeratów.

Abstract

The study investigated changes in torque during granulation of fine material (foundry bentonite) in disc granulator with changing process and apparatus parameters. The bed of loose material was sprayed during dosing, at a constant liquid flow rate $Q = 0.5 \cdot 10^{-3}$ dm³ / s with the use of a sprinkler, which ensured even distribution of the spraying liquid. The granulation process was carried out each time until the material was completely wetted in the apparatus. Throughout the process, the instantaneous values of the torque on the granulator shaft were recorded. The unit moments M^* (per unit of bulk mass) were determined on the basis of the measured values, taking into account the idle moment and changes in the bulk mass in the plate. It was found that the process and apparatus parameters had a significant influence on the function $M^* = f(t)$. This is related to the changing properties of the wetted bed and granulate, on which the nature of the bed's movement depends, and thus the moment necessary to tilt the bed and induce its circulation necessary to induce the mechanisms of formation and growth of agglomerates.

Słowa kluczowe: granulacja talerzowa, moment obrotowy

Keywords: disc granulation, torque

*autor korespondencyjny: dr hab. inż. Andrzej Obraniak prof. PŁ: andrzej.obraniak@p.lodz.pl

1. Wstęp

W talerzach granulatorów obrotowych realizowanych jest wiele procesów aglomeracji różnych surowców. Specyfika każdego z nich wymaga odmiennego, określonego charakteru ruchu cząstek w ruchomym złożu. Większość prac badawczych dotyczących tego zagadnienia było wykonywanych z myślą o uzyskaniu dużej efektywności mieszania, suszenia czy rozdrabniania w młynach kulowych [1-10]. Odmienny charakter ruchu złoża jest wymagany dla osiągnięcia korzystnych warunków procesu aglomeracji. Zjawiska tworzenia i wzrostu granulek występują bowiem głównie na powierzchni swobodnej cyrkulującego złoża, a więc jej ukształtowanie i wielkość decydują o przebiegu procesu. Z uwagi na znaczenie zachowania się złoża podczas prowadzenia procesu oraz na związek między ruchem ziaren, a kątem pochylenia powierzchni swobodnej wsadu w bębnie Heim i wsp. [11] podjęli próbę opisanie procesu granulacji poprzez pomiar wspomnianego kąta i uzależnienie go od pozostałych parametrów. Trudność z pomiarem kąta β [12-13] skłoniła autorów [14-16] do zastąpienia tego parametru i wykorzystania do opisu dynamiki złoża wartości momentu obrotowego, energii lub dostarczonej mocy (mocą granulacji). Wcześniejsze badania [17-18] wykazały, że podczas operacji prowadzonych na modelowych materiałach ziarnistych w aparatach obrotowych wartość momentu mierzonego na wale zależy między innymi od prędkości kątowej i związanego z nią charakteru ruchu złoża. Opierając się na wynikach badań modelowych określono analogiczne zależności dla rzeczywistego materiału ziarnistego /bentonitu/ podczas procesu granulacji bezciśnieniowej) [19-20]. Na rys.1. w sposób graficzny przedstawiono przebieg zmian zredukowanego (jednostkowego) momentu obrotowego na jednostkę masy wsadu w całym cyklu granulacji od rozpoczęcia nawilżania, aż do przewilżenia materiału. Pomiar

momentu obrotowego M realizowany był co 1s. Zredukowany moment M^* był definiowany wzorem (1):

$$M^* = \frac{M - M_j}{m_s + m_w} \quad (1)$$

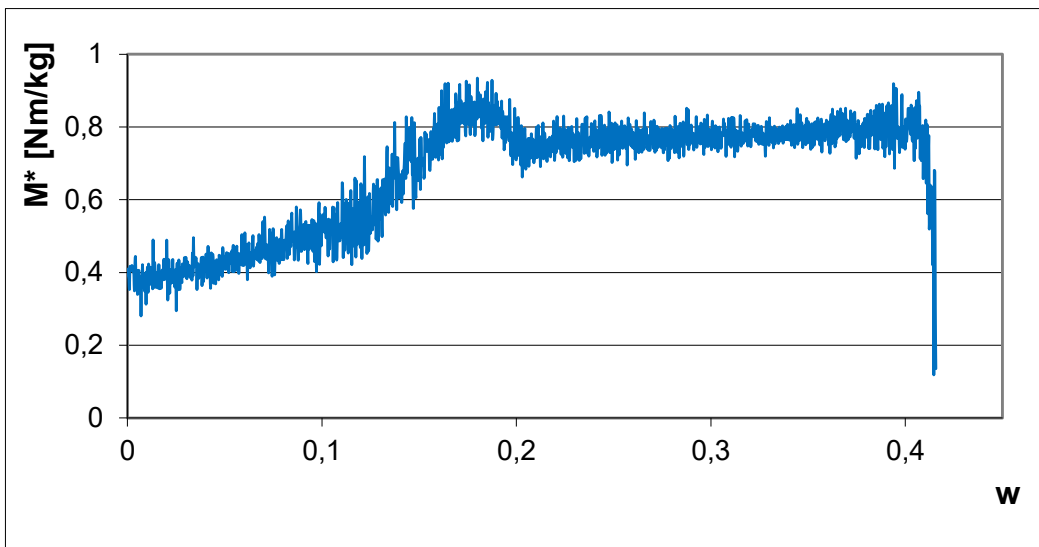
gdzie:

M_j - moment biegu jałowego dla pustego talerza [Nm]

M^* - moment zredukowany (jednostkowy) [Nm/kg]

m_s - masa materiału sypkiego umieszczonego w talerzu [kg]

m_w - masa dodanej cieczy zwilżającej [kg]



Rys. 1. Zmiany momentu zredukowanego (jednostkowego) wraz z wzrostem wilgotności złoza
[źródło: opracowanie własne].

Analizując charakter zależności graficznej momentu zredukowanego od wilgotności (czasu granulacji) można wyszczególnić każdorazowo trzy okresy, dla których otrzymano różne charaktery omawianej zależności. W pierwszym okresie zależność momentu zredukowanego od wilgotności (czasu nawilżania, a

jednocześnie czasu granulacji) ma w przybliżeniu postać wielomianu drugiego rzędu, w drugim okresie obserwuje się spadek wartości momentu, który następuje po osiągnięciu maksymalnej jego wartości, a w trzecim, najdłuższym występuje stałość momentu zredukowanego. Proces kończy się wskutek oblepiania wewnętrznych ścianek aparatu materiałem, a przez to zanikaniem zjawiska przesypywania złoża z czym wiąże się gwałtowny spadek wartości momentu obrotowego. Taki charakter dynamicznych zależności można tłumaczyć zaistniałymi podczas prowadzenia procesu zmianami parametrów charakteryzujących granulowane złożo. Zmianom ulega wówczas średnica granulek, współczynnik tarcia, gęstość nasypowa oraz wilgotność złoża. Szczególnie interesujące, ze względu na czas ich trwania są dwa z zaobserwowanych przedziałów: początkowy wzrost momentu oraz jego późniejsze ustalenie.

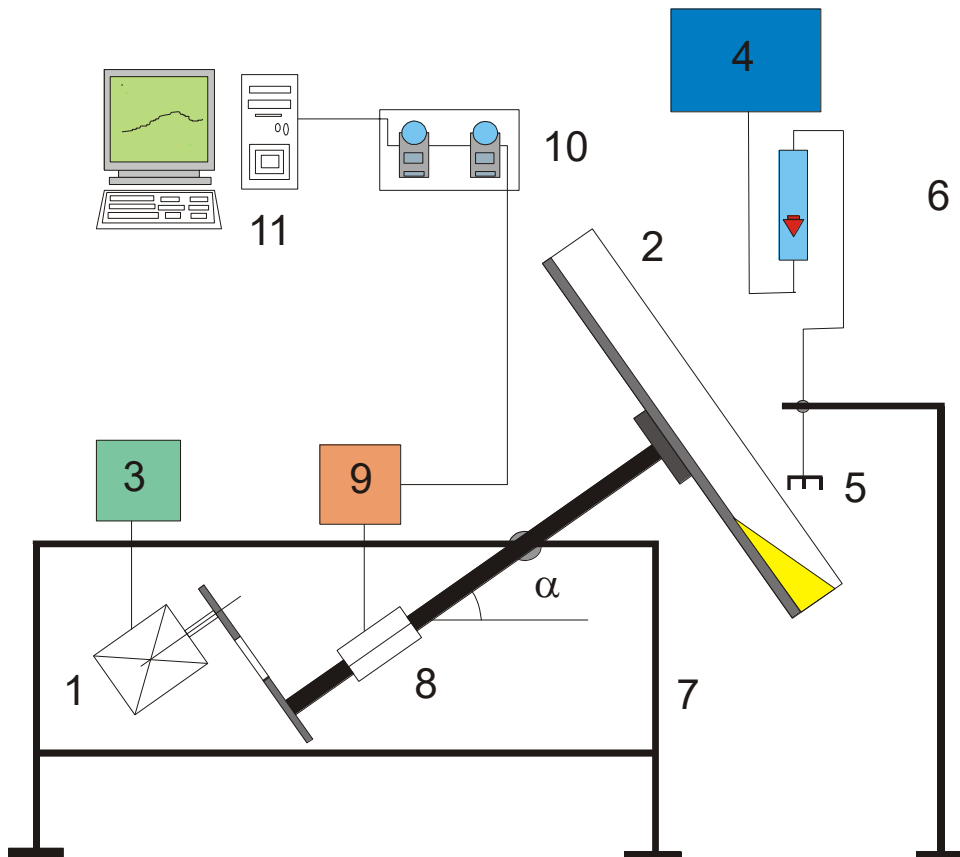
2. Cel pracy

Celem pracy było zbadanie czy ciągły pomiar momentu obrotowego podczas granulacji talerzowej może być wskaźnikiem realizacji procesu.

3. Aparatura

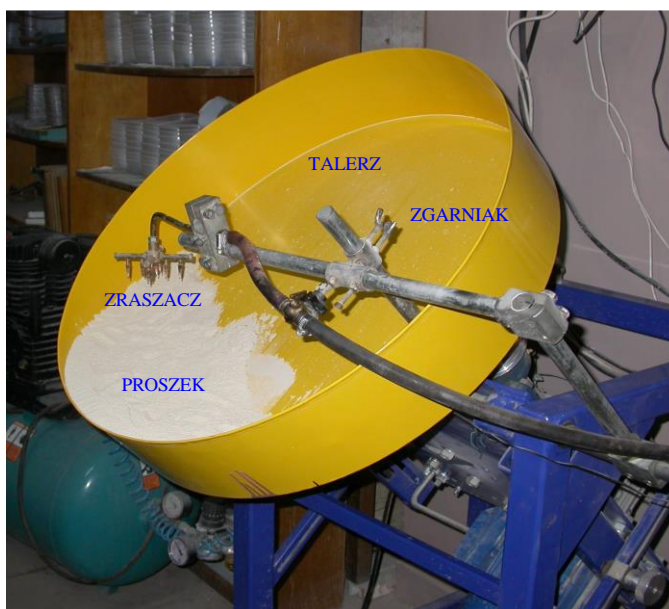
Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym, którego schemat przedstawiono na rysunku 2 (zdjęcie stanowiska pokazano na rysunku 3). Motoreduktor (1) poprzez przekładnię pasową napędzał talerz granulatora (2). Stosując falownik (3) otrzymywano płynną zmianę prędkości obrotowej talerza, którą kontrolowano wykorzystując obrotomierz. Ciecz zwilżającą (wodę destylowaną) ze zbiornika (4) dostarczano kroplowo na przesypującą się w talerzu warstwę złoża ziarnistego (w dolnej części talerza) za pomocą zraszacza hydraulicznego (5) aż do otrzymania określonej wilgotności. Stałe natężenie

dopływu cieczy ustalano każdorazowo za pomocą rotametru (6). Aby zapewnić stałe ciśnienie podawanej cieczy przez cały czas trwania próby utrzymywano stały poziom cieczy w zbiorniku (4). Zastosowanie ruchomej płyty nośnej (wchodzącej w skład podstawy 7), do której przymocowano łożyska wału granulatora, dało możliwość zmian kąta α talerza. Chwilowe wartości momentu obrotowego mierzono momentomierzem (8), z którego sygnał podawano do czytnika (9). Do przetwarzania danych wykorzystano analogowo-cyfrowy moduł kontrolno-pomiarowy ADAM (10) oraz komputer (11) (służył do zliczania i rejestrowania danych pomiarowych).



Rys. 2. Schemat aparatury do badań granulacji talerzowej [źródło: opracowanie własne].

W trakcie badań przeprowadzano analizę granulometryczną każdej reprezentatywnie pobranej próbki, stosując do tego celu zestaw sit o rozmiarach oczek kolejno: 0.5, 1, 2, 4, 6.3, 8, 10, 12.5 mm. Uzyskane w ten sposób frakcje kolejno ważono wagą laboratoryjną, po czym próbkę zawracano. Otrzymane na tej podstawie udziały masowe kolejnych frakcji posłużyły do obliczenia średniej średnicy.



Rys. 3. Zdjęcie stanowiska badawczego [źródło: opracowanie własne].

4. Materiały użyte do badań

Do prób granulacji użyto bentonitu odlewniczego. Bentonit jest materiałem polidispersyjnym. Jest to skała ilasta składająca się głównie z minerałów montmorillonitu i beidelitu. Charakteryzuje się warstwową budową sieci krystalicznej, zdolnością do pochłaniania wody i innych ciekłych związków organicznych oraz wymiany kationów. Gęstość właściwa bentonitu $\rho_b=2420 \text{ kg/m}^3$.

Bentonit odlewniczy użyty do badań pochodził z Zakładów Górniczo-Metalowych „ZĘBIEC” w Zębcu. Posiada on następujące własności fizyczne:

- zakres zmian wymiarów ziaren $0-0.16$ mm,
- średni objętościowy wymiar ziarna $d_s=0.056$ mm,
- gęstość nasypowa $\rho_p=789,5$ kg/m³.

Cieczą zwilżającą, stosowaną do granulowania bentonitu była woda.

5. Zakres badań

W czasie badań stosowano następujące zakresy zmian parametrów:

- średnica talerza granulatora $D=0.7$ m,
- wysokość burty $L=0.24$,
- stopień wypełnienia aparatu materiałem $k=10\%$,
- względna prędkość obrotowa $n_w=0,15-0,3$.

6. Metodyka pomiarów

W czasie badań procesu granulacji określano wartość momentu jałowego na wale granulatora oraz zmienne w czasie następujące parametry granulowanego materiału:

- skład ziarnowy i średni wymiar cząstek granulowanego złoża,
- wartość momentu obrotowego na wale granulatora podczas trwania procesu.

Umieszczone w bębnie złoże ziarniste nawilżano kropłowo, przy stałym natężeniu wypływu cieczy $Q=50$ ml/min., aż do przewilżenia materiału powodującego obklepienie się złoża na ścianie wewnętrznej granulatora. Złoże nawilżano za pomocą zraszacza generującego krople o rozmiarze ok. 4 mm. Przez cały czas próby utrzymywano stały poziom cieczy w zbiorniku, co zapewniało stałe ciśnienie podawanej cieczy. Jako ciecz zwilżającą zastosowano wodę. Chwilowe

wartości momentu obrotowego (co 1 sek.) mierzono momentomierzem i poprzez czytnik przetwarzano oraz rejestrowano w komputerze. W stałych odstępach czasu talerz zatrzymywano i pobierano z wnętrza aparatu próbki wsadu do oceny własności granulowanego materiału. Po dokonaniu odpowiednich pomiarów próbkę zwracano do dalszej granulacji.

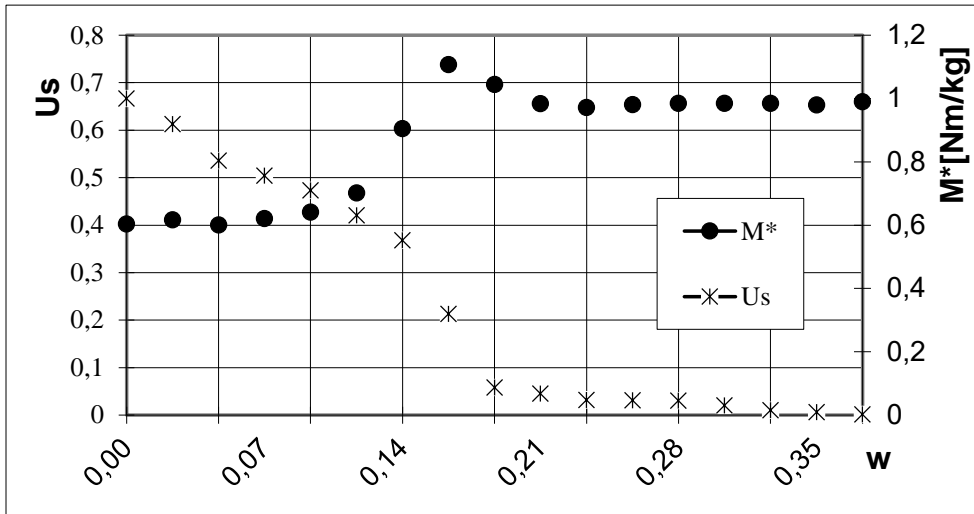
7. Wyniki badań

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że na wykresach opisujących zależności zmian badanych parametrów istnieje charakterystyczny punkt, który wyznacza moment czasowy, w którym zgranulowany został cały przetwarzany surowiec. Przykładowo przedstawiono to na rys. 4., na którym zestawiono zmianę momentu zredukowanego oraz udziału objętościowego frakcji o (0, 1). Frakcja ta uznawana była za materiał niezgranulowany w trakcie procesu.

Można zauważyć, że udział niezgranulowanego materiału, gwałtownie spada dla wilgotności (bądź czasu nawilżania), przy której moment zredukowany rośnie do wartości maksymalnej. Po ustaleniu się wartości momentu zredukowanego na stałym poziomie materiału niezgranulowanego spada poniżej 4%.

Zależność przedstawiona na rys. 4. wykazuje, że zmiana właściwości przetwarzanego złoża ziarnistego wynikająca z jego dalszego granulowania, czyli ze wzrostu wymiaru wszystkich ziaren układu nie wpływa już na zmianę wartości momentu obrotowego zredukowanego. Moment jednostkowy zmienia bowiem swą wartość tylko w wypadku zmian wynikających z dynamiki poruszającego się granulowanego złoża, a ruch tego wypełnienia ustala się wraz z zgranulowaniem całego surowca. Jest to konsekwencją własności materiału ziarnistego, który w odróżnieniu od pyłów (charakteryzujących się dużą spójnością) jest sypki. W przypadku, gdy całe przetwarzane złożo stanowi zbiór granulek, to kaskaduje ono wokół pewnego centrum cyrkulacji, co decyduje o stałości momentu przeliczonego

na jednostkę masy. Reasumując zmiany wartości momentu w trakcie trwania procesu granulacji talerzowej mogą stanowić wskaźnik jego realizacji.



Rys. 4. Porównanie zmian wartości momentu zredukowanego i udziału sumarycznego materiału nie zgranulowanego w czasie granulacji [źródło: opracowanie własne].

8. Wnioski

1. Analiza uzyskanych wyników pozwala stwierdzić, że ciągły pomiar wartości momentu na wale granulatora talerzowego może być kryterium realizacji procesu granulacji talerzowej.

2. Stwierdzono korelacje w charakterze zmian wartości momentu obrotowego oraz zmian udziału sumarycznego materiału niezgranulowanego.

Literatura

- [1] Olejnik T.P., *Kinetics of grinding ceramic bulk considering grinding media contact points*, Physicochemical problems of mineral processing **44**, 2010, str. 187-194.
 [2] Mellmann J., *The transverse motion of solids in rotating cylinders – forms of motion and transition behavior*, Powder Technology **118**, 2001, str. 251-270.

- [3] Olejnik T.P.: *Milling kinetics of chosen rock materials under dry conditions considering strength and statistical properties of bed*, Physicochemical problems of mineral processing **46**, 2011, str. 145-154.
- [4] Oyama Y. *Studies on mixing of binary system of two size by ball mill motion*, Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Research (Tokyo) No. **951**, 37, 1940, str. 17-29.
- [5] Kapur P.C., Ranjan S., Fuerstenau D.W.: *A cascade-cataract charge flow model for power draft of tumbling mills*, Int. J. of Miner. Proc. **36**, 1992, str. 9-29.
- [6] Olejnik T.P.: *Selected mineral materials grinding rate and its effect on product granulometric composition*, Physicochemical problems of mineral processing **49**, 2, 2013, str. 407-418, DOI: 10.5277/ppmp130203.
- [7] Hogg R., Fuerstenau D.W.: *Power relationships for tumbling mills*. Trans. SME-AIME **252**, 1972, str. 418-423.
- [8] Arbiter N., Harris C.C.: *Scale-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, Ch. **26**, 1982, str. 491-508.
- [9] Rieger F., Jirout T., Moravec J., Stelmach J., Kuncewicz, C.: *The phenomenon of increased mixing power consumption during tank emptying*, Przemysł Chemiczny **98**, 6, 2019, str. 962-966. DOI 10.15199/62.2019.6.21.
- [10] Stelmach J., Kuncewicz, C., Szufa S., Jirout T., Rieger F.: *The Influence of Hydrodynamic Changes in a System with a Pitched Blade Turbine on Mixing Power*, Processes **9**, 1, 68, 2021. DOI 10.3390/pr9010068.
- [11] Heim A., Gluba T., Kochański B., Obraniak A., Załuga T.: *Kształt przekroju poprzecznego warstwy ziarnistej w bębnie obrotowym*, Inż. Chem. i Proc. **1**, 1995, str. 95-116.
- [12] Heim A., Gluba T., Obraniak A.: *Changes of the angle of natural batching during drum granulation*, Proceedings 30th International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering (Tatranske Matliare 26-30.05), CD-ROM, P.226, s.1-6, 2003.
- [13] Heim A., Obraniak A.: *Zmiany kąta naturalnego usypu podczas granulacji bębnowej bentonitu*, Inż. Apar. Chem. **42**(34), z.spec.3, 2003, str.58-59.
- [14] Heim A., Gluba T., Obraniak A.: *Torque as an indicator of the advance of drum granulation process*, Materiały 29th International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering (27-31.05 Tatranske Matliare, Slovakia), CD-ROM, P.130, s.1-7, 2002.
- [15] Heim A., Gluba T., Obraniak A.: *The effect of the wetting droplets size on the value of torque during the drum granulation*, Proceedings of the 4th International Conference for conveying and handling of particulate solids (Budapest 27-30.05), vol.1, s.3.26-3.31, 2003.
- [16] Heim A., Gluba T., Obraniak A.: *The effect of the wetting droplets size on power consumption during drum granulation*, Granular Matter **6**, 2004, str.137-143.

- [17] Heim A., Gluba T., Obraniak A.: *Bed dynamics during drum granulation*, Physicochemical Problems of Mineral Processing **38**, 2004, str.167-176.
- [18] Heim A., Kaźmierczak R., Obraniak A.: *Wpływ średnicy talerza na wartość momentu obrotowego podczas granulacji talerzowej*, Inż. Apar. Chem. **43**(35), 3, 2004, str. 9-12.
- [19] Heim A., Kaźmierczak R., Obraniak A.: *Model dynamiki złoża ziarnistego w granulatorze talerzowym*, Inż. Chem. Proc. **25**, 3/2, 2004, str. 993-998.
- [20] Heim A., Kaźmierczak R., Obraniak A.: *The effect of equipment and process parameters on torque during disk granulation of bentonite*, Physicochemical Problems of Mineral Processing **38**, 2004, str.157-166.