

MODELOWANIE I ANALIZA PŁYNIĘCIA MATERIAŁU ROZDROBNIONEGO PODCZAS ŚCINANIA W REOMETRZE PIERŚCIENIOWYM Z WYKORZYSTANIEM METODY ELEMENTÓW DYSKRETNÝCH

Marcin CHUTKOWSKI*¹, Wojciech ZAPAŁA¹, Mateusz PRZYWARA¹

¹ Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Chemiczny, Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, al. Powstańców Warszawy 12, tel.+48 17 865 17 37, e-mail: ichmchl@prz.edu.pl

Ze względu na fakt, że komórka Jenike'go została zaprojektowana i jest stosowana do testów materiałów proszkowych pod obciążeniem rzędu setek kPa, charakterystycznych dla procesów wielkotonażowych, jest nieodpowiednim narzędziem do badań materiałów w warunkach obciążeń znacznie poniżej 10 kPa. Ponadto, konstrukcja komórki Jenike'go sprawia, że ścinaniu poddawany jest wąski obszar testowanej próbki, podczas gdy większość materiału pozostaje nieruchoma. Jako alternatywę zaproponowano badanie w szczelinowym reometrze pierścieniowym, skonstruowanym w taki sposób, że pasmo ścinania obejmuje całą objętość testowanego materiału. Po przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych zastosowano symulację komputerową ścinania proszku, opartą na metodzie DEM, do przeanalizowania rozkładów czasowo-przestrzennych niemierzalnych eksperymentalnie właściwości fizycznych złoża. Wyniki symulacji stanowią podstawę wniosku o pasmie ścinania wypełniającym całą szczelinę reometru.

Słowa kluczowe: Materiały proszkowe, szczelinowy reometr pierścieniowy, metoda elementów dyskretnych DEM

1. Wstęp

Metody eksperymentalne pozwalające określić warunki płynięcia proszku opierają się na koncepcji zaproponowanej w pracy Jenike'go [1], dotyczącej projektowania silosów. Istotą pomysłu jest poddanie próbki materiału działaniu serii określonych obciążeń normalnych i zbadanie wielkości sił stycznych, koniecznych do wywołania wzajemnego ruchu ziaren, tj. płynięcia materiału. W wyniku pomiarów możliwe jest ustalenie wartości granicznych par obciążeń (normalnych i stycznych), których przekroczenie powoduje ruch materiału rozdrobnionego obserwowany jako jego płynięcie. Komórka Jenike'go znalazła powszechne zastosowanie w projektowaniu aparatury do magazynowania i transportu materiałów rozdrobnionych [2], jednak zakres obciążeń jakie przewidziano w metodzie sięgający 100-300 kPa dyskwalifikuje ten rodzaj badań w przypadku swobodnie płynących, słabo obciążonych materiałów sypkich. Wadami komórki Jenike'go, wynikającymi z prostej konstrukcji aparatu, są także krótka droga ścinania próbek, sięgająca kilku milimetrów, oraz zawężenie pasma ścinania do niewielkiego fragmentu złoża sięgającego grubości kilkudziesięciu średnic cząstek. Jak stwierdzono doświadczalnie podczas ścinania materiału rozdrobnionego w komórce Jenike'go przemieszczeniu ulega tylko niewielki procent złoża, podczas gdy reszta materiału w próbce praktycznie pozostaje w spoczynku [3]. Wymienionych wad pozbawione są pierścieniowe aparaty obrotowe o nieskończenie długiej drodze ścinania. Jedno z takich rozwiązań – szczelinowy reometr pierścieniowy – opisano po raz pierwszy w pracy [3], a po konsultacjach z autorem wykonano i wykorzystano w badaniach na Wydziale Chemicznym Politechniki Rzeszowskiej [4,5]. Zaletą aparatu, poza możliwością zbadania warstwy proszku o kontrolowanej i niewielkiej grubości, jest rozszerzenie zakresu obciążeń normalnych (pionowych) do wartości rzędu kilku kPa, co odpowiada obciążeniom charakterystycznym dla takich operacji jednostkowych jak mieszanie, granulacja, fluidyzacja itd. Problemem jednak pozostaje kwestia czy wzajemne ruchy ziaren odpowiadające za ścinanie materiału

mają miejsce w całej warstwie proszku, czy następuje dalsze zawężenie pasma ścinania. Opublikowano szereg prac umożliwiających śledzenie zmian w czasie i przestrzeni właściwości płynącego złoża cząstek metodami nieinwazyjnymi [6–8], ale ograniczają się one do określania płaskich, dwuwymiarowych pól prędkości bądź porowatości materiału. Skutecznym rozwiązaniem może się zatem okazać uprzednio zweryfikowana eksperymentalnie symulacja komputerowa procesu wykorzystująca metodę elementów dyskretnych (DEM), która pozwala śledzić i analizować rozkłady czasowo-przestrzenne wielu właściwości fizycznych charakteryzujących złożę. Celem pracy było przeprowadzenie symulacji komputerowej procesu ścinania próbki materiału rozdrobnionego w szczelinowym reometrze pierścieniowym z wykorzystaniem DEM oraz analiza zmian wybranych właściwości złoża podczas ścinania.

2. Część teoretyczna

2.1. Metoda elementów dyskretnych (DEM)

Metoda elementów dyskretnych umożliwia symulacje numeryczne procesów transportu materiału rozdrobnionego, w którym śledzona jest trajektoria każdej cząstki w rozważanym układzie (domenie obliczeniowej). Podstawą metody zaproponowanej po raz pierwszy w pracy [9] jest powtarzający się cykl obliczeniowy oparty na II zasadzie dynamiki Newtona oraz wybranym modelu sił kontaktu, powstających w momencie zderzenia się ścian elementów układu. Pierwsze z praw jest wykorzystywane do ustalenia przyspieszenia, prędkości i drogi każdej cząstki w ustalonym kroku czasowym, w oparciu o wypadkową siłę działającą na cząstkę na skutek zderzeń z sąsiednimi elementami układu. Z kolei model kontaktu określa sposób wyznaczenia sił i momentów sił podczas kontaktu powierzchni ziaren między sobą i ze ścianami układu pomiarowego. Cały cykl dla przyjętego, odpowiednio krótkiego, kroku czasowego powtarza się wielokrotnie do osiągnięcia założonego, rzeczywistego czasu trwania symulacji lub osiągnięcia stanu równowagi (minimalizacja sił między elementami układu).

Ruch postępowy (translacyjny) dowolnej cząstki opisuje równanie Newtona (1):

$$m \frac{dV}{dt} = F_g + F \quad (1)$$

gdzie: V – prędkość postępową cząstki, t – czas, m – masa cząstki, F_g – siła grawitacji, F – wypadkowa sił przyciągania i odpychania pomiędzy cząstkami. Ruch obrotowy cząstek definiuje równanie (2):

$$I \frac{d\omega}{dt} = M \quad (2)$$

gdzie: I – moment bezwładności cząstki, ω – prędkość kątowna cząstki, M – moment sił działających na cząstkę.

Na siły przyciągania składają się głównie siły elektrostatyczne i siły kohezji, natomiast na siły odpychające siły van der Waalsa i siły kontaktu (zderzenia). Ze względu na znikomy udział pozostałych,

największe znaczenie mają siły kontaktu, które determinują siłę wypadkową działającą na cząstkę. Modele matematyczne opisujące sposób ustalania sił kontaktu są zróżnicowane i uzależnione od właściwości fizykochemicznych rozpatrywanego układu. W literaturze dostępnych jest kilka modeli sił kontaktu, lecz ze względu na ograniczoną wydajność współczesnych komputerów wobec ogromnego zapotrzebowania na moc obliczeniową metody DEM i związaną z tym konieczność optymalizacji algorytmów stosowane są przede wszystkim najprostsze: liniowy model sił kontaktu oraz nieliniowy model Hertza–Mindlina [9, 12]. Oba należą do grupy modeli tzw. słabego kontaktu, dopuszczających wzajemne, częściowe nakładanie się (inaczej: przenikanie się) przestrzeni cząstek. W nieliniowym modelu Hertza–Mindlina, wykorzystanym w pracy, składowe normalna F_n (działająca równoległe do prostej łączącej środki cząstek) i styczna F_t (prostopadła do normalnej) siły powstającej w wyniku kontaktu obu cząstek, opisują odpowiednio równania (3) i (4), w których uwzględniono człony odpowiadające za rozpraszanie (tłumienie) energii zderzeń:

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{3/2} - 2 \sqrt{\frac{5}{6} \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}} \sqrt{2 E^* \sqrt{R^*} \delta_n m^* v_n^{\overline{rel}}} \quad (3)$$

$$F_t = 8 G^* \sqrt{R^*} \delta_n \delta_t - 2 \sqrt{\frac{5}{6} \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}} \sqrt{8 G^* \sqrt{R^*} \delta_n m^* v_t^{\overline{rel}}} \quad (4)$$

gdzie: R^* – średnia geometryczna promieni zderzających się cząstek, E^* – średni moduł elastyczności zderzających się cząstek, G^* – średnia geometryczna modułu Kirchhoffa zderzających się cząstek, e – współczynnik tłumienia, δ_n – długość obszaru nakładania się cząstek wzdłuż linii łączącej ich środki, δ_t – długość obszaru nakładania się cząstek wzdłuż prostopadłej do linii łączącej ich środki, m^* – średnia geometryczna mas zderzających się cząstek, $v_n^{\overline{rel}}$ – względna prędkość cząstek w kierunku normalnym, $v_t^{\overline{rel}}$ – względna prędkość cząstek w kierunku stycznym.

Średni moduł elastyczności obliczany jest z zależności (5):

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_A^2)}{E_A} + \frac{(1-\nu_B^2)}{E_B} \quad (5)$$

gdzie: E_A , E_B – moduł Younga zderzających się cząstek A i B , ν_A , ν_B – współczynnik Poissona zderzających się cząstek A i B .

Model Hertza–Mindlina dodatkowo ujmuje wpływ zjawiska tarcia podczas zderzeń poprzez ograniczenie maksymalnej bezwzględnej wartości stycznej składowej siły F_s , wg warunku Coulomba:

$$|F_s| \leq \mu_s |F_n| \quad (6)$$

gdzie: μ_s – współczynnik tarcia statycznego.

W równaniu opisującym ruch obrotowy cząstki (2) występuje moment siły M , który w przypadku modelu Hertza – Mindlina wyznacza się następująco:

$$M = R \times F_t - \frac{\Delta\omega}{|\Delta\omega|} \mu_r F_n \quad (7)$$

gdzie: R – odległość między punktem kontaktu, a środkiem ciężkości cząstki, $\Delta\omega$ – różnica prędkości obrotowych zderzających się cząstek, μ_r – współczynnik tarcia tocznego.

Procedura obliczeniowa metody DEM wymaga deklaracji odpowiedniej wartości kroku czasowego w procedurze numerycznego całkowania równań. Wielkość tę ustala się w taki sposób, aby nie miały miejsca błędy związane z nadmiernym przenikaniem się cząstek oraz innych elementów układu pomiarowego. Co więcej, należy unikać zjawiska propagacji zaburzeń poza obszar najbliższego sąsiedztwa cząstki w pojedynczym kroku czasowym [10]. Właściwym kryterium, każdorazowo weryfikowanym przed rozpoczęciem procedury obliczeniowej, okazuje się czas krytyczny Rayleigha T_R , zaczerpnięty z teorii rozprzestrzeniania się akustycznych fal powierzchniowych i na potrzeby metody DEM opisany równaniem:

$$T_R = \frac{\pi r}{0,1631\nu + 0,8766} \sqrt{\frac{\rho_s}{G}} \quad (8)$$

gdzie: r – promień cząstki, ρ_s – gęstość cząstki, ν – współczynnik Poissona, G – moduł Kirchhoffa.

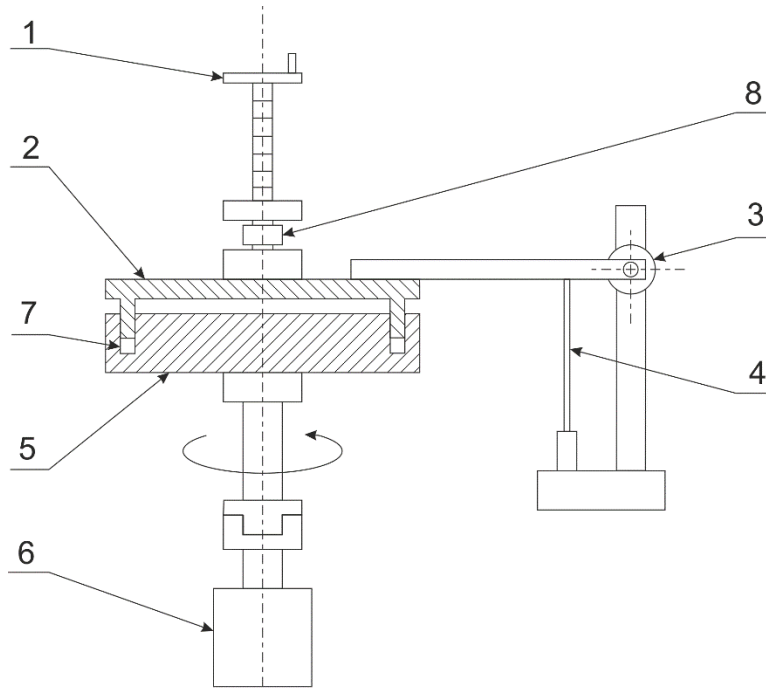
W pracy ustalono wartość kroku czasowego na poziomie 25% czasu krytycznego Rayleigha T_R , obliczonego dla najmniejszej z cząstek w układzie.

3. Część eksperymentalna

3.1. Szczelinowy reometr obrotowy

Głównymi elementami reometru, którego schemat przedstawiono na Rys. 1, są dwa poziomo usytuowane talerze ścinające wykonane z polerowanej stali nierdzewnej 18/10. Talerz dolny posiada pierścieniową szczelinę, a talerz górny w komplementarny występ, dopasowany wymiarami do talerza

dolnego. Talerz górny, który generuje obciążenie próbki, jest zamocowany na łożyskowej osi i wyposażony w czujnik siły pionowej, czujnik siły stycznej (oba o dokładności 0,5 N) oraz czujnik położenia (dokładność 1 mm). Talerz dolny jest połączony z napędem z możliwością regulacji prędkości obrotowej w zakresie 5–300 1/min. Wszystkie odczyty z czujników są poprzez wzmacniacz sygnału gromadzone w komputerze z zainstalowaną aplikacją CatmanEasy v. 2.1 (firmy HBM), przy założonej częstotliwości rejestracji sygnału na poziomie 50 Hz.



Rys. 1. Schemat szczelinowego reometru obrotowego: 1 – regulator położenia górnego talerza, 2 – talerz górny, 3 – czujnik siły stycznej, 4 – czujnik położenia, 5 – talerz dolny obrotowy, 6 – napęd reometru, 7 – szczelina pomiarowa, 8 – czujnik siły normalnej

Fig. 1. Scheme of annular rheometer: 1 – upper plate position controller, 2- upper plate, 3 – tangential (shear) force sensor, 4 – position sensor, 5 – lower rotary plate, 6 – rheometer drive, 7 – shearing gap, 8 – normal force sensor

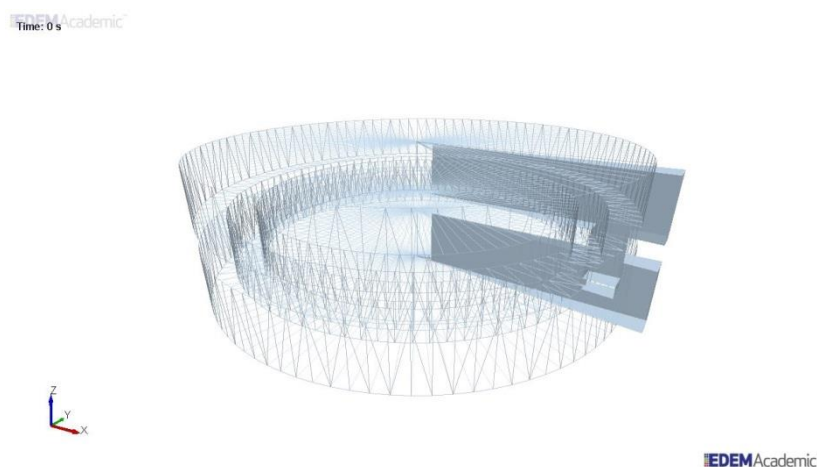
Metodyka pomiarów polega na równomiernym wypełnieniu szczeliny reometru badanym materiałem sypkim o grubości warstwy na poziomie ok. 20 średnic ziaren (ustalany przy wykorzystaniu czujnika położenia), ustaleniu pożądanego obciążenia pionowego materiału poprzez docisk górnym talerzem, uruchomieniu ruchu obrotowego dolnego talerza i rejestracji sił normalnych i stycznych wywołujących ścinanie materiału. Przed przystąpieniem do symulacji komputerowej, która jest zasadniczym celem pracy, przeprowadzono test ścinania próbki materiału, którym są szklane cząstki kuliste. Właściwości materiału oraz wyniki testu zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Parametry złoza cząstek szklanych i wyniki przeprowadzonego na nim testu ścinania w reometrze szczelinowym
 Table 1. Parameters of glass beads used in experiment with results of annular rheometer shearing test

Parametry materiału rozdrobnionego		
Gęstość materiału, ρ_s [kg/m ³]		2500
Rozkład wielkości cząstek, [%]	0,2 – 0,25 mm	1
	0,25 – 0,3 mm	3
	0,3 – 0,4 mm	77
	0,4 – 0,5 mm	19
Średnica zastępcza zbioru cząstek, d_p [mm]		0,3655
Prędkość obrotowa reometru, [min ⁻¹]		5
Prędkość ścinania złoza, $\dot{\gamma}$ [s ⁻¹]		5
Naprężenie normalne, σ_n [kPa]		8 ± 0,125
Stosunek naprężenia normalnego i stycznego, σ_n/τ_s [-]		0,255 ± 0,074

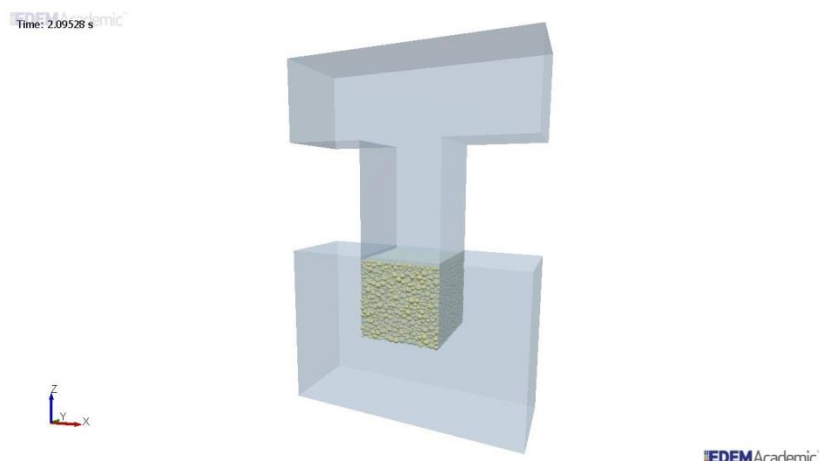
3.2. Symulacja procesu ścinania w reometrze obrotowym

Wykorzystując metodę elementów dyskretnych (DEM) z nieliniowym modelem kontaktu Hertza–Mindlina [10-12] przeprowadzono symulację ścinania materiału w szczelinowym reometrze pierścieniowym przy wykorzystaniu komercyjnej aplikacji EDEM 2.7 Academic Version (DEM Solutions Ltd.). W pierwszym etapie, w celu skrócenia czasu obliczeń geometryczny model aparatu zastąpiono jego wycinkiem stanowiącym 1/60 długości obwodowej całej szczeliny pomiarowej (Rys. 2). Tak uproszczony model geometrii układu pozwala na 60-krotne zmniejszenie liczby cząstek, co znacznie skraca czas obliczeń potrzebnych do zrealizowania kilkusekundowej procedury ścinania. Szczelina pomiarowa została wypełniona modelowym materiałem sypkim o właściwościach odpowiadających rzeczywistym cząstkom szklanym (Tab. 2). Model wycinka szczeliny wypełnionej materiałem rozdrobnionym przedstawiono na Rys. 3. Przyjęto, że cząstki są generowane w losowym położeniu w obrębie szczeliny pomiarowej, posiadają losową średnicę w zadanym przedziale zgodnie z rozkładem normalnym Gaussa, ich początkowa prędkość kątowa jest losowa, lecz nie większa niż 1 rad/s, natomiast początkowa prędkość translacyjna jest równa 0 m/s.



Rys. 2. Implementacja geometrii reometru w przestrzeni programu EDEM – reometr z zaznaczonym wycinkiem

Fig. 2. Virtual representation of rheometer geometry in EDEM environment – rheometer with marked section



Rys. 3. Implementacja geometrii reometru w przestrzeni programu EDEM – wycinek reometru wypełniony materiałem

Fig. 3. Virtual representation of rheometer geometry in EDEM environment – rheometer section filled with powder

Tabela 2. Parametry złoża cząstek i reometru użyte podczas symulacji metodą DEM

Table 2. Parameters of powder and rheometer applied in DEM simulation

Właściwości zbioru cząstek		Właściwości ścian układu pomiarowego (reometru)	
Gęstość, ρ_s [kg/m ³]	2 500	Gęstość stali ρ_s , kg/m ³	8 000
Liczba cząstek, n [-]	10 000		
Zakres średnic, d [m]	$2,5 \div 5 \times 10^{-4}$		
Odchylenie standardowe średnic, %	5		
Współczynnik tarcia statycznego cząstka-cząstka μ_s , [-]	0,5	Współczynnik tarcia statycznego cząstka-ściana μ_s , [-]	0,1
Współczynnik tarcia toczonego cząstka-cząstka μ_r , [-]	0,01	Współczynnik tarcia toczonego cząstka-ściana μ_r , [-]	0,01
Współczynnik tłumienia cząstka-cząstka e , [-]	0,7	Współczynnik tłumienia cząstka-ściana e , [-]	0,7
Moduł Kirchhoffa G , [Pa]	$2,62 \times 10^{10}$	Moduł Kirchhoffa G , [Pa]	8×10^{10}
Współczynnik Poissona ν , [-]	0,2	Współczynnik Poissona ν , [-]	0,3

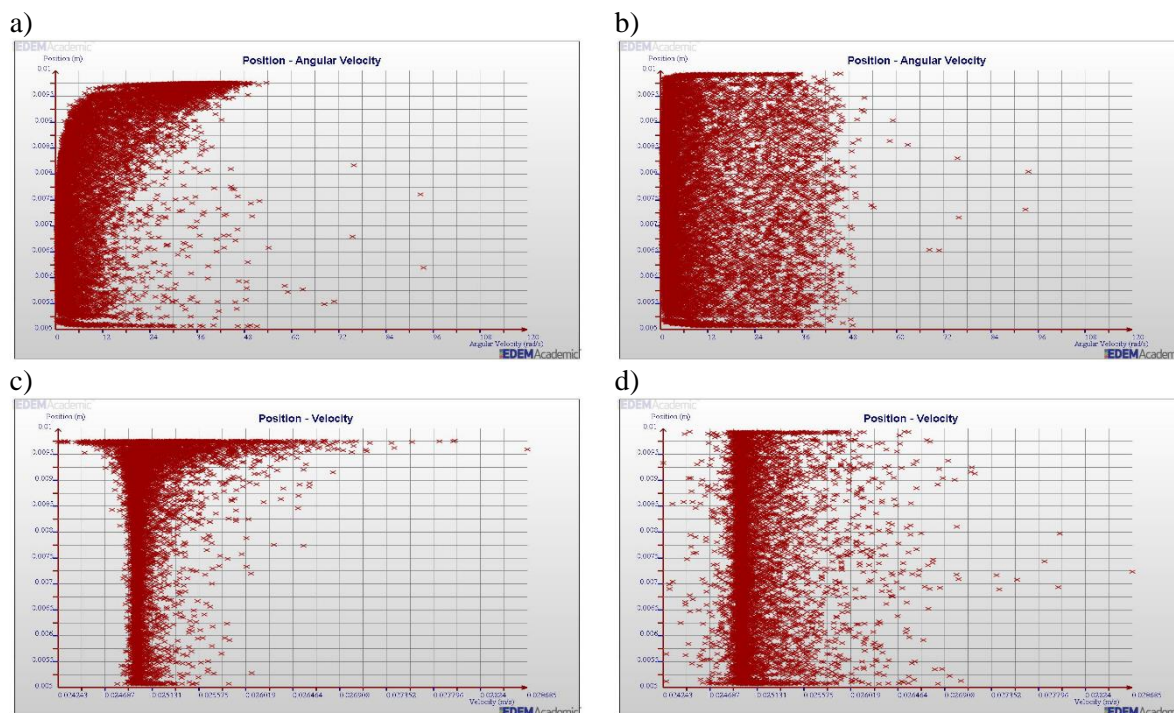
W pierwszej sekundzie symulacji cząstki opadły swobodnie na dno szczeliny wskutek działania siły ciężenia. Po tym czasie uruchomiony został serwo mechanizm umożliwiający kontrolowanie obciążenia pionowego σ_n złoża talerzem górnym, które jest obliczane w oparciu o sumę pionowych składowych sił kontaktu pomiędzy wycinkiem górnego talerza reometru a wszystkimi cząstkami pozostającymi z nim w kontakcie, w bieżącym kroku czasowym. Wszystkie parametry układu były zapisywane w pamięci komputera z częstotliwością co 0,01 s przez cały czas trwania symulacji. W celu zweryfikowania poprawności przyjętych parametrów symulacji zmierzono stosunek naprężeń normalnego i stycznego w materiale i uzyskano wynik: $\sigma_n/\tau_s = 0,2433 \pm 0,016$, a zatem zbliżony do uzyskanego eksperymentalnie (Tab. 1).

4. Dyskusja wyników

W celu zilustrowania wpływu obciążeń na zachowanie cząstek w złożu na Rys. 4 przedstawiono rozkłady średnich w czasie prędkości obrotowych ω oraz rozkłady średnich prędkości translacyjnych

cząstek V po osiągnięciu efektu stabilnego płynięcia złoża (tj. po 1 s od rozpoczęcia procesu), zmierzonych wzdłuż wysokości próbki (wzdłuż osi Z) oraz wzdłuż szerokości próbki (wzdłuż osi X).

O ile rozkład średniej czasowej rejestrowanych wielkości wzdłuż osi X (tj. wzdłuż szerokości próbki) jest przypadkowy i równomierny (Rys. 4 b, d), to dla zmian obserwowanych wzdłuż wysokości złoża (wzdłuż osi Z , Rys. 4 a, c) charakterystyczny jest wzrost zarówno średnich prędkości obrotowych ω , jak i prędkości translacyjnych V cząstek zlokalizowanych w pobliżu ściany górnego talerza reometru.

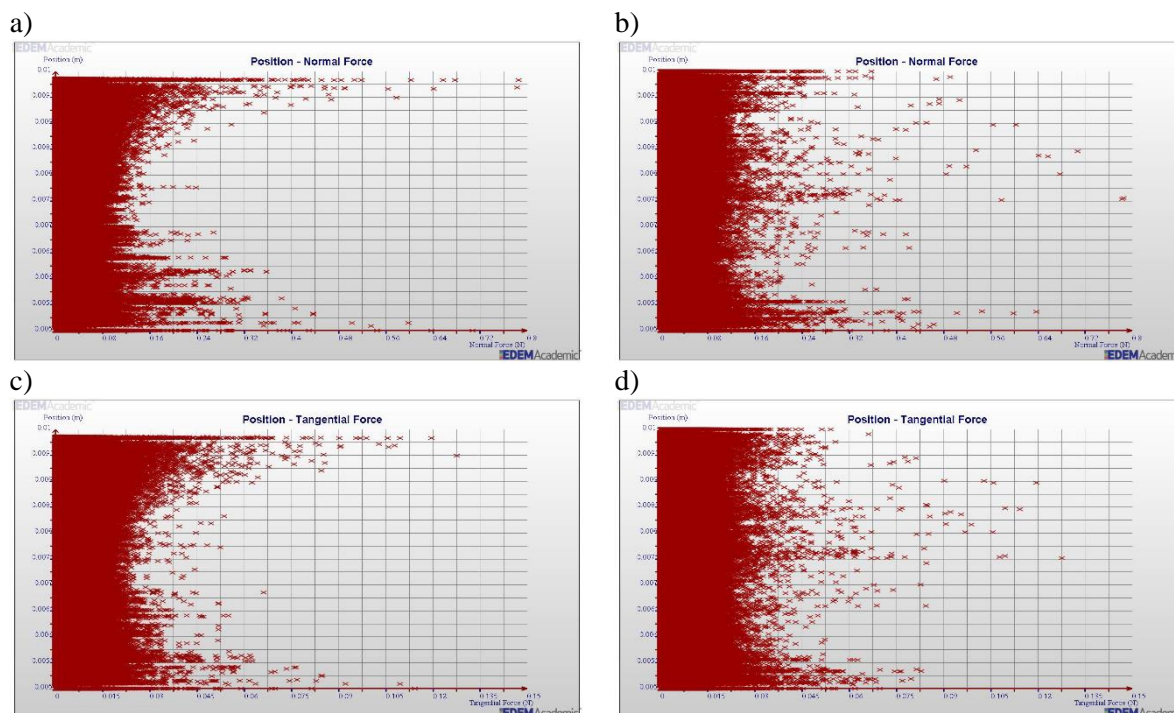


Rys. 4. Rozkłady przestrzenne średniej w czasie prędkości obrotowej cząstek ω : a) wzdłuż osi Z , b) wzdłuż osi X , oraz rozkłady przestrzenne średniej w czasie prędkości translacyjnej cząstek V : c) wzdłuż osi Z , d) wzdłuż osi X

Fig. 4. Spatial distributions of time average of particle rotational velocity ω : a) along Z axis, b) along X axis, and spatial distributions of time average of particle translational velocity V : c) along Z axis, d) along X axis

Większość cząstek w głębi złoża charakteryzuje się średnią prędkością obrotową ω nie przekraczającą wartości 12 rad/s, tymczasem cząstki zlokalizowane w bezpośrednim sąsiedztwie ściany górnego talerza osiągają prędkości obrotowe rzędu 45 rad/s i więcej. Przyrost wartości średnich prędkości obrotowych ω jest dość gwałtowny począwszy od odległości ok. 1 mm od ściany górnego talerza. Rozkład średnich prędkości translacyjnych nie wykazuje tak znaczących dysproporcji. Większość cząstek porusza się z prędkością postępową V zbliżoną do prędkości obwodowej dolnego talerza tj. 2.5×10^{-3} m/s. Jedynie cząstki znajdujące się tuż pod górnym talerzem reometru charakteryzują się nieco szerszym rozrzutem stwierdzonych prędkości średnich $V \in (2,4 \div 2,7 \times 10^{-3}$ m/s). Jest to potwierdzenie tezy, że pasmo ścinania, w którym odbywa się ruch ziaren dotyczy całej szczeliny reometru obrotowego.

Na Rys. 5 można prześledzić rozkłady przestrzenne wielkości związanych z oddziaływaniami cząstek w punktach ich kontaktu. Średnie w czasie składowe sił w punktach kontaktu osiągają wartości nie przekraczające odpowiednio $F_n = 0,8$ N i $F_t = 0,15$ N. W przypadku rozkładów wzdłuż wysokości złoża (wzdłuż osi Z , Rys. 5 a, c) można zaobserwować spadek wartości składowych w połowie wysokości próbki odpowiednio do wartości poniżej $F_n = 0,16$ N i $F_t = 0,03$ N. Bezpośredni kontakt cząstek ze ścianami szczeliny pomiarowej ma zatem wpływ na podwyższenie wielkości sił powstających na skutek ich zderzeń.



Rys. 5. Rozkłady przestrzenne średniej w czasie normalnej składowej siły w punktach kontaktu cząstek F_n : a) wzdłuż osi Z, b) wzdłuż osi X; rozkłady przestrzenne średniej w czasie stycznej składowej siły w punktach kontaktu cząstek F_t : c) wzdłuż osi Z, d) wzdłuż osi X

Fig. 5. Spatial distributions of time average of normal force in contact points F_n : a) along Z axis, b) along X axis, and spatial distributions of time average of shear force in contact points F_t : c) along Z axis, d) along X axis

5. Wnioski

- Metoda elementów dyskretnych (DEM) jest narzędziem umożliwiającym obserwację zmian czasowych i przestrzennych wielu właściwości opisujących złożę materiału sypkiego w czasie jego przepływu, w tym parametrów, których pomiar jest trudny, bądź niemożliwy metodami eksperymentalnymi;
- Równomierne rozkłady prędkości translacyjnych cząstek modelowego materiału sypkiego wypełniających pierścieniową szczelinę reometru wskazują, że pasmo ścinania dotyczy całej szczeliny bez powstawania stref nieruchomych, jak to ma miejsce w przypadku ścinania proszku w komórce Jenike'go;
- Wyraźny wzrost wartości wypadkowych prędkości obrotowych cząstek zlokalizowanych w bezpośrednim sąsiedztwie górnego talerza reometru świadczy o zjawisku poślizgu cząstek w najwyższej położonej warstwie proszku, w szczelinie reometru;
- Równomierne rozkłady składowych normalnych i stycznych sił kontaktu w punktach zderzeń cząstek świadczą o ujednorodnieniu naprężeń ściskających w całej przestrzeni złoża poddanego badaniu w reometrze;
- Konieczne są dalsze badania potwierdzające, że pasmo ścinania obejmuje całe złożę cząstek w szczelinie reometru wobec zastosowania szerokiego zakresu obciążeń i prędkości obrotowych aparatu, także w przypadku materiałów proszkowych o zróżnicowanych właściwościach fizykochemicznych.

Literatura

- [1] Jenike, A. W., Storage and flow of solids, *Bulletin of Univ. of Utah*, 1964, 53, Salt Lake City, DOI: 10.2172/5240257
- [2] ASTM D6128, Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell

- [3] Klausner, J.F., Chen, D., Mei, R., Experimental investigation of cohesive powder rheology, *Powder Techn.*, 2000, 112, 94-101, DOI: 10.1016/s0032-5910(99)00310-1
- [4] Olechowski M., Wpływ wilgotności na właściwości reologiczne materiałów sypkich, 2012, Praca doktorska, Politechnika Rzeszowska
- [5] Opaliński I., Chutkowski M., Hassanpour A., Rheology of moist food powders as affected by moisture content, *Powder Techn.*, 2016, 294, 315-322, DOI: 0.1016/j.powtec.2016.02.049
- [6] Sielamowicz I., Balevicius R., Experimental and computational analysis of granular material flow in model silos, *IPPT Reports on Fundamental Technological Research*, 2013, IPPT PAN, 1, 1-317
- [7] Niedostatkiewicz M., Tejchman J., Investigations of porosity changes during granular silo flow using electrical capacitance tomography (ETC) and particle image velocimetry (PIV), *Part.Part.Syst.Charact.*, 2007, 24, 304-312, DOI: 10.1002/ppsc.200601133
- [8] Ostendorf M., Schwedes J., Application of Particle Image Velocimetry for velocity measurements during silo discharge, *Powder Techn.*, 2005, 158, 69-75, DOI: 10.1016/j.powtec.2005.04.020
- [9] Cundall, P.A., Strack, O.D., A discrete element model for granular assemblies, *Géotechnique*, 1979, 29(1), 47-65, DOI :10.1680/geot.1979.29.1.47
- [10] Hassanpour A., Pasha M., 2014, Discrete Element Method Applications in Process Engineering in Introduction to Software for Chemical Engineers, CRC Press, DOI: 10.1201/b17150-8
- [11] Matuttis H.-G., Chen J., 2014, Understanding the Discrete Element Method, Wiley & Sons, Singapore, DOI: 10.1002/9781118567210
- [12] Zhu H.P., Zhou Z.Y., Yang R.Y., Yu A.B, Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments, *Chem. Eng. Sci.*, 2007, 62, 3378 – 3396, DOI: 10.1016/j.ces.2006.12.089

MODELLING AND ANALYSIS OF POWDER FLOW DURING SHEARING IN ANNULAR RHEOMETER USING DISCRETE ELEMENT METHOD

S u m m a r y

Due to the fact that Jenike's cell has been designed and used for testing powder materials under load of hundreds of kPa, characteristic for large-tonnage processes, it is an inappropriate tool for testing materials under load conditions well below 10 kPa. As an alternative, an annular cell rheometer test constructed in such a way that the shear band covers the entire volume of material tested is proposed. After the experimental tests, a computer simulation of powder shearing, based on the Discrete Element Method (DEM), was used to analyze time-spatial distributions of experimentally unmeasurable physical properties of the powder bed. The simulation results proved that the shearing band covers entire rheometer gap.

Keywords: Particulate materials, annular rheometer, discrete element method

Przesłano do redakcji: 17.03.2020

Przyjęto do druku: 23.04.2020