

Dariusz GRUSZCZYŃSKI*, Piotr WODZIŃSKI*

WILGOTNOŚĆ I TARCIE W MATERIAŁACH ZIARNISTYCH A PROCES PRZESIEWANIA

Celem niniejszej pracy jest wprowadzenie współczynnika tarcia (uogólnionego) jako wielkości mającej istotny wpływ na proces przesiewania materiałów ziarnistych. Opracowana przez autorów niniejszej pracy tzw. iteracyjna metoda wyznaczania powierzchni sit, która prowadzi do oszacowania wielkości sita dla danej sprawności (skuteczności procesu) i dla danej wydajności przepustowej maszyny, stanie się podstawą do uwzględnienia wpływu wilgoci w procesie przesiewania. Wprowadzono oś liczbową na której zaznaczono (w zależności od zmiennej wilgotności materiału ziarnistego) granice różnych rodzajów przesiewania: przesiewanie suche, przesiewanie mokre i odwadnianie. Metodą badania pojemności wodnej modelowych materiałów ziarnistych określono granice (obszar graniczny) pomiędzy odwadnianiem a przesiewaniem mokrym.

Zastosowanie badania ścinania materiałów ziarnistych pozwoliło na określenie współczynników tarcia wewnętrznego (utożsamianych z uogólnionym współczynnikiem tarcia) oraz uwzględnienie wilgotności w materiale ziarnistym, w odniesieniu do procesu przesiewania. Niniejsza praca jest fragmentem większej całości dotyczącej przesiewania wilgotnych, modelowych materiałów ziarnistych.

1. WSTĘP

Materiały uziarnione – to materiały jakimi zajmują się: inżynieria procesowa, przeróbka kopalin stałych, technologia surowców mineralnych. Dotyczy to zarówno wszelkich materiałów wsadowych, stanowiących nadawy procesów technologicznych, jak i powstałych z nich w toku przeróbki produktów pośrednich i końcowych. Najbardziej charakterystyczną cechą takich materiałów, umożliwiającą rozróżnienie ziaren pomiędzy sobą, jest wielkość ziaren. Jest ona jednocześnie ważną cechą technologiczną, decydującą we wszystkich praktycznie przypadkach o możliwościach i zakresie zastosowania lub wyborze sposobu dalszej przeróbki materiału. Stąd wynika istotna rola procesu klasyfikacji ziarnowej (granulometrycznej). Jest to proces rozdziału mieszanin ziarnistych na frakcje, różniące się od siebie wielkościami ziaren. Proces ten bywa prowadzony w urządzeniach powietrznych, hydraulicznych, mechanicznych lub kombinowanych. Najbardziej rozpo-

* Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Katedra Aparatury Procesowej, ul. Stefanowskiego 12/16, 90-924 Łódź.

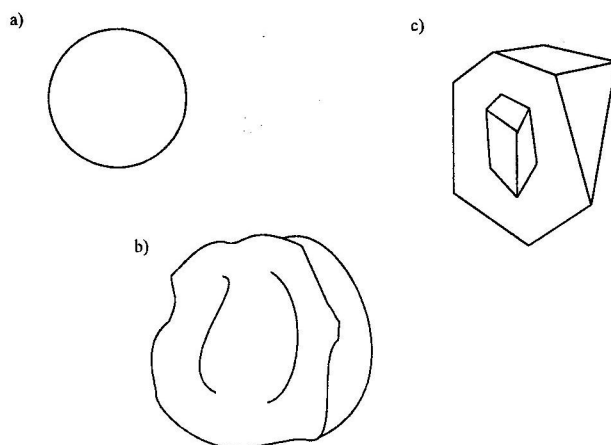
wszechniona jest klasyfikacja mechaniczna, czyli przesiewanie. Przesiewaniem, zwanym inaczej segregacją sitową, nazywamy rozdział mieszaniny ziarnowej na sicie na zbiory ziaren o założonych granicach wielkości. Mimo istotnego znaczenia procesu przesiewania oraz licznych prac na ten temat, brak jest nadal całościowego ujęcia procesu, rozpatrującego jednocześnie znaczenie poszczególnych parametrów w zjawisku segregacji granulometrycznej na sicie. Jest natomiast niewielka liczba prac traktujących o zachowaniu się materiału wilgotnego w procesie przesiewania.

Niniejsza praca dotyczy materiałów ziarnistych sypkich w warstwie, z uwzględnieniem ich wilgotności. W literaturze dotyczącej tematu znane są jedynie nieliczne prace traktujące o obecności warstwy ziarnistej na sicie przesiewacza. Zdecydowana większość autorów zajmuje się modelem przesiewania opisującym pojedyncze ziarno, poruszające się po sicie. Celem pracy jest wyznaczenie wartości współczynnika statycznego i dynamicznego wilgotności krytycznej dla trzech podstawowych (zaproponowanych) materiałów modelowych. Doświadczalne wielkości wyznaczone w tej pracy mogą być pomocne przy projektowaniu przesiewaczy, co w pewnym stopniu zmierza do dokładniejszego poznania zjawiska przesiewania na mokro i wykorzystania tego faktu przez konstruktorów maszyn przesiewających.

2. KSZTAŁT ZIARNA

Układem badanym nazywamy zestawienie materiał–sito. Ma ono zasadnicze znaczenie w procesie przesiewania, chociaż wielu autorów w ogóle nie uwzględnia wielkości takich, jak typ sita i kształt ziaren przesiewanych. Na podstawie wielu doświadczeń przesiewania na różnych przesiewaczach (przemysłowych i laboratoryjnych) wykonanych przez Andrzejczaka i Wodzińskiego (1994) w Instytucie Inżynierii Procesowej Politechniki Łódzkiej i na przesiewaczach w przemyśle, proponuje się trzy podstawowe grupy kształtów ziaren materiałów sypkich, są to: ziarna kuliste (rys. 1a), ziarna nieregularne (rys. 1b), ziarna ostrokrawędziowe (rys. 1c). Ich kształty pokazano na rys. 1.

Każdy ze spotkanych w praktyce przemysłowej materiałów ziarnistych można „przybliżyć” kształtem ziaren do jednego z wyżej wymienionych materiałów modelowych. Przedstawicielem ziaren okrągłych mogą być ziarna zbóż (roślin), materiały ceramiczne i wiele produktów chemicznych, przesiewanych przed ich wysłaniem do odbiorcy. Ziaren nieregularnych spotykamy najczęściej w przemyśle kruszyw budowlanych i pokrewnych, a ich typowym przedstawicielem jest piasek. Trzeci materiał ziarnisty, składający się z ostrokrawędziowych, nieregularnych ziaren krystalicznych, reprezentowany jest najczęściej przez kopaliny, ale nie tylko. Typowym materiałem o krystalicznych ziarnach jest np. cukier.



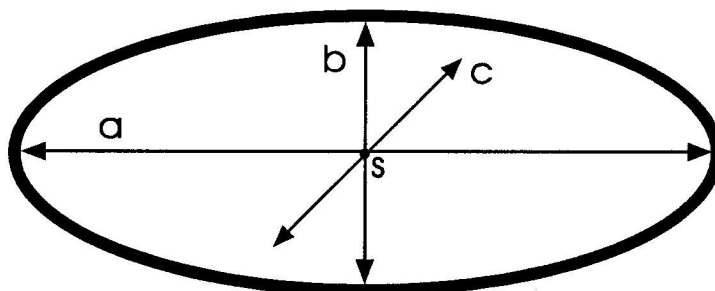
Rys. 1.

3. WŁAŚCIWOŚCI SUCHYCH MATERIAŁÓW ZIARNISTYCH

Materiałom ziarnistym możemy przypisać wiele cech, jednak tylko niektóre z nich mają istotny wpływ na proces przesiewania. Należą do nich: własności geometryczne ziaren i ich rozkłady w danym materiale, gęstość materiału, własności mechaniczne.

Własności geometryczne ziaren, czyli wielkość i kształt, to podstawowe wielkości wpływające w sposób znaczący na przebieg procesu przesiewania. Istotne znaczenie ma wielkość ziaren, oznaczana literą d i definiowana jako liniowa długość boku kwadratowego otworu sita, przez które to ziarno przechodzi.

Wśród wielu możliwości określania wielkości ziarna, dla procesu przesiewania decydująca jest wielkość sitowa ziarna, oznaczana symbolem d_s . Wartość liczbową wielkości sitowej można związać z układem rozmiarów głównych ziarna. Trzy charakterystyczne dla danego ziarna rozmiary główne to: długość – a , szerokość – c , grubość (wysokość) – b przedstawione na rysunku 2.



Rys. 2.

Gdyby pomiędzy rozmiarami głównymi pojedynczego ziarna występowały pomijalne różnice, do rozważań nad procesem przesiewania wystarczyłoby uwzględnienie tylko wielkości ziarna. Niestety ziarna zdecydowanej większości surowców mineralnych są anizometryczne czyli wykazują istotne różnice systematyczne między poszczególnymi rozmiarami głównymi. Wywołuje to konieczność uwzględniania również kształtu ziarna, co ilościowo określają współczynniki liczbowe. Dla procesu przesiewania istotne znaczenie ma współczynnik kształtu:

$$W_k = \frac{c}{b}. \quad (1)$$

Współczynnik ten zachowuje znaczną stałość wartości dla poszczególnych materiałów ziarnistych, zarówno naturalnych, jak i sztucznych.

Kulisty czynnik kształtu ziarna. Znanych jest kilka różnych wyrażeń matematycznych, które ujmują ilościowo kształt powierzchni zewnętrznej ziaren. W inżynierii procesowej najczęściej stosowany jest czynnik, definiowany jako stosunek powierzchni ziarna do powierzchni kuli o tej samej objętości co ziarno. Na użytek procesów mechanicznych realizowanych z udziałem materiałów ziarnistych proponuje się tzw. kulisty czynnik kształtu ziarna, który jest definiowany jako:

$$\varepsilon_K = \frac{b \cdot c}{a^2} \quad (2)$$

gdzie a , b i c są wymiarami głównymi ziarna (rys. 2).

Ten zapis ujmuje wszystkie wielkości podstawowe kształtu ziarna. Powyżej zdefiniowana forma równania przyjmuje nazwę kulistego czynnika kształtu ziarna i jest oznaczana e_K . Do rozważań przyjęto kilka innych definicji czynnika kształtu, lecz kulisty czynnik kształtu ziarna wydaje się najwłaściwszym, mającym największe zastosowanie praktyczne.

Rozpatrywanie ziaren pojedynczych nie jest możliwe, gdyż każdy materiał ziarnisty składa się z bardzo znacznej liczby ziaren. Rozwiązaniem tego problemu są charakterystyki ziarnowe materiału, będące zespołem informacji o rozkładzie wielkości ziaren w tym materiale. Oparte są zawsze na rozważaniu grup ziaren o określonych wielkościach. Zagadnienie to najpełniej jest opracowane w literaturze (Sztaba 1993).

Mimo ogromnej różnorodności materiałów ziarnistych ich własności mechaniczne są podobne, a przy tym różne od cech takich materiałów, jak metale czy tworzywa sztuczne. Odrębność cech wynika głównie z dwu- lub trójfazowej budowy materiałów ziarnistych. Dla wszystkich materiałów ziarnistych cechy mechaniczne są wspólne, a występujące różnice mogą być jedynie ilościowe.

4. ROLA WILGOCI W MATERIALE ZIARNISTYM

Woda znajdująca się pomiędzy ziarnami przesiewanego materiału ma duże znaczenie w procesie przesiewania. Polega ono zwłaszcza na:

- ułatwianiu ruchu ziarn pomiędzy sobą i względem powierzchni sitowej w przypadku występowania wody w takiej ilości, że nie jest ona utrzymywana już przez siły napięcia powierzchniowego i może poruszać się swobodnie, niezależnie od ziarn (tzw. woda grawitacyjna),

- utrudnianiu procesu przesiewania, gdy zawartość wody jest niewielka i występuje ona tylko na powierzchni ziarn, gdzie jest utrzymywana przez siły napięcia powierzchniowego, w szczególności siły kapilarne w przestrzeniach między ziarnami (woda adhezyjna i kapilarna), sprzyjając tworzeniu się agregatów ziarn; takie same zjawiska, lecz o mniejszym nasileniu, powoduje woda higroskopijna; różnica polega na tym, że woda adhezyjna i kapilarna mogą przemieszczać się po powierzchni ziarna w stanie ciekłym – przepływać, a woda higroskopijna może jedynie ulec odparowaniu i skropleniu w innym miejscu powierzchni ziarna, co wynika z odmiennego charakteru przeważających sił utrzymujących cząsteczki wody przy powierzchni ciała stałego.

Występowanie lub brak poszczególnych rodzajów powiązań wody z materiałem przesiewanym zależy od ilości wody w stosunku do fazy stałej i od własności powierzchniowych tej ostatniej. Możliwe układy woda – materiał ziarnisty przedstawiono na rys. 3.

- a) ziarna pozbawione wilgoci – materiał suchy,
- b) woda występująca na powierzchni ziarn – utrzymywana przez siły napięcia powierzchniowego,
- c) woda występująca w przestrzeniach między ziarnami – utrzymywana przez siły kapilarne,
- d) woda adhezyjna i kapilarna – początek tworzenia się konglomeratów ziarn,
- e) woda grawitacyjna – grube warstewki cieczy znacznie zmniejszające siły tarcia i przyczepności.

Występowanie wody w materiale przesiewanym określa ilościowo jego *wilgotność* (pojemność wodna) zawartość masowa wody (wilgoci) w danym materiale zgodnie z BN-72/0520-08 :

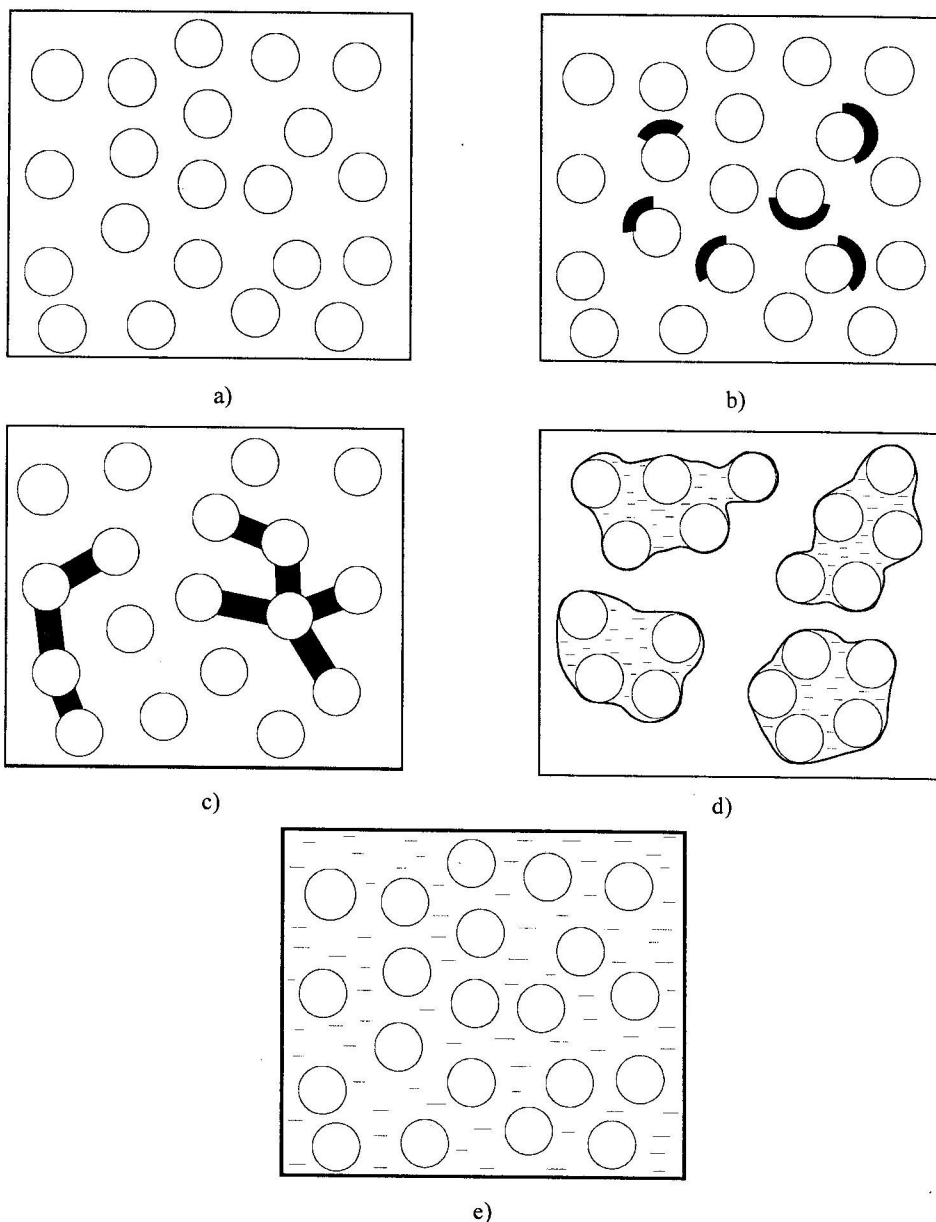
$$W = \frac{q_w}{q_s} \cdot 100\% \quad (4)$$

gdzie:

q_w – masa wody zawartej w badanej próbce materiału, kg,

q_s – masa suchej próbki, kg.

Masę wody q_w określa się najczęściej jako różnicę między masą próbki wilgotnej q i masą tej samej próbki po wysuszeniu do stałej masy w temperaturze od 105



Rys. 3

do 110 °C – q_s lub też przez pomiar objętości wody odparowanej z badanego materiału razem z nierozpuszczalną w wodzie cieczą pomocniczą (ksylen, toluen) w przypadku materiałów łatwo utleniających się przy podgrzaniu (węgiel brunatny, niektóre węgle kamienne). Szczegóły postępowania określają normy. W zależności od rodzajów związku wody z materiałem stałym, utrzymuje się ona w nim bardziej lub mniej trwale. Na tej podstawie wyróżnia się następujące rodzaje wilgoci:

– W_p – wilgoć przemijająca – stanowiąca tę część wody, którą materiał traci podczas suszenia na powietrzu, osiągając stan równowagi z wilgocią atmosferyczną;

– W_h – wilgoć materiału powietrzno-suchego, którą tworzy woda pozostała w materiale po wysuszeniu go na powietrzu i osiągnięciu stanu równowagi z wilgocią atmosferyczną; wodę tę materiał traci po wysuszeniu go w temperaturze od 105 do 110 °C lub poprzez destylację;

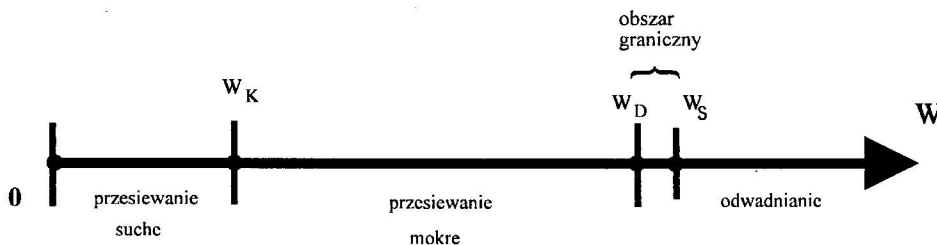
– W_c – wilgoć całkowita, będącą sumą wilgoci przemijającej i wilgoci materiału powietrzno-suchego.

Wilgoć przemijającą tworzy woda zawarta w materiale jako woda grawitacyjna wraz z przeważającą częścią lub całością wody adhezyjnej i kapilarnej. Woda higroskopijna tworzy natomiast wilgoć materiału powietrzno-suchego, stąd poprzednio używano dla niej nazwy wilgoci higroskopijnej – nie była ona całkowicie ścisła, nie uwzględniała bowiem resztkowych zawartości (zależnych od stanu środowiska) wody adhezyjnej i kapilarnej.

Zależnie od wilgotności materiału W – zawartości w nim wody – wyróżnia się rodzaje przesiewania :

- suche – gdy zawartość wody nie wpływa w znaczącym stopniu na zachowanie się ziarna,
- wilgotne – gdy zawartość wody w istotnym stopniu ogranicza ruch ziarn, zarówno pomiędzy sobą, jak i przez otwory sita przesiewanie wilgotne może częściowo pokrywać się z przesiewaniem mokrym,
- mokre – gdy znaczna zawartość wody grawitacyjnej ułatwia swobodne ruchy ziarn dzięki wytwarzaniu pomiędzy nimi stosunkowo grubych warstewek znacznie zmniejszających siły tarcia i przyczepności, a także dzięki spełnianiu zadania dodatkowego czynnika transportowego, przenoszącego ziarna przez otwory sita.

Granice między rodzajami przesiewania mają charakter płynny i zależą od licznych czynników, których omówienie jest oddzielnym problemem. Przejście między jednym, a drugim rodzajem przesiewania charakteryzuje się przez wartości współczynników krytycznych zawartości wilgoci. Zakresy rodzajów przesiewania zilustrowano na osi liczbowej przedstawionej na rys. 4. Na osi tej przedstawiono dwie wartości współczynników wilgotności krytycznej, są to odpowiednio dynamiczny W_D i statyczny współczynnik wilgotności W_S . Przedstawiona oś licz-



Rys. 4.

bową zawiera trzy granice, charakterystyczne dla procesu przesiewania: W_K , W_D , W_s . Granica W_K dotyczy oddzielenia przesiewania suchego od mokrego. Oznacza ona, iż w zakresie $0-W_K$ obowiązują, dla danego materiału, znane powszechnie w teorii i praktyce przesiewania zależności. Pomiędzy przesiewaniem mokrym a odwadnianiem jest jednak pewna granica będąca obszarem ($W_D - W_s$). Zakres ten, podobnie jak i granica W_K , wyznaczany doświadczalnie zależy od cech charakteryzujących materiał ziarnisty. Dotychczas wykonane przez autorów badania sugerują istnienie takich właśnie granic pomiędzy różnymi rodzajami przesiewania materiałów suchych i wilgotnych. Materiał w czasie spoczynku lub w czasie transportu (np. na przenośniku taśmowym lub w trakcie transportu mokrego) można scharakteryzować statycznym współczynnikiem wilgotności krytycznej. Po rozpoczęciu procesu przesiewania część zawartej w materiale wody ulegnie oddzieleniu przez sito na skutek drgań przesiewacza. Materiał ulega wtedy bardzo szybkiemu procesowi oddzielenia wody od materiału ziarnistego. Wilgoć pozostała jest określana przez dynamiczny współczynnik wilgotności krytycznej. Współczynnik ten dokładniej opisuje stan wilgotności materiału ziarnistego w trakcie trwania procesu.

5. WSPÓŁCZYNNIKI TARCIA W MATERIAŁACH ZIARNISTYCH

Materiał ziarnisty, jak inne ciała, wykazuje tarcie zarówno w trakcie przesuwania po powierzchni, jak i wewnątrz swojej objętości. Istnieje więc potrzeba zdefiniowania wielkości opisującej te zjawiska dla dowolnych materiałów. Do rozważań należało przyjąć współczynniki charakteryzujące tarcie materiałów ziarnistych. Przyjęto, że tarcie występuje w dwu obszarach. Pierwsze – to tarcie wewnątrz materiału ziarnistego. Drugie – to tarcie materiału ziarnistego o powierzchnię sita. Tarcie wewnątrz masy materiału ziarnistego i po powierzchni sita ma oczywisty wpływ na proces przesiewania. Rozpatrując wpływ tarcia na ten proces należy dokładnie rozpatrzyć wpływ poszczególnych obszarów tarcia na całość procesu. Oczywiście wielkością opisującą całość tych zjawisk będzie współczynnik tarcia uogólnionego materiału ziarnistego:

$$\mu_0 = \mu_0(W, \epsilon_K) \quad (5)$$

Mając tak zdefiniowaną postać współczynnika tarcia uogólnionego można wyznaczyć go poprzez badanie materiału metodą ścinania bezpośredniego.

Do dyskusji należało przyjąć następujące możliwe postaci współczynnika tarcia:

- μ_{ws} – wewnętrzny statyczny współczynnik tarcia,
- μ_{wk} – wewnętrzny kinematyczny współczynnik tarcia,
- μ_{zs} – zewnętrzny statyczny współczynnik tarcia,
- μ_{zk} – zewnętrzny kinematyczny współczynnik tarcia.

Zaproponowano ponadto postać ogólną współczynnika tarcia uogólnionego :

$$\mu_o = f(\mu_{ws}, \mu_{wk}, \mu_{zs}, \mu_{zk}) \quad (6)$$

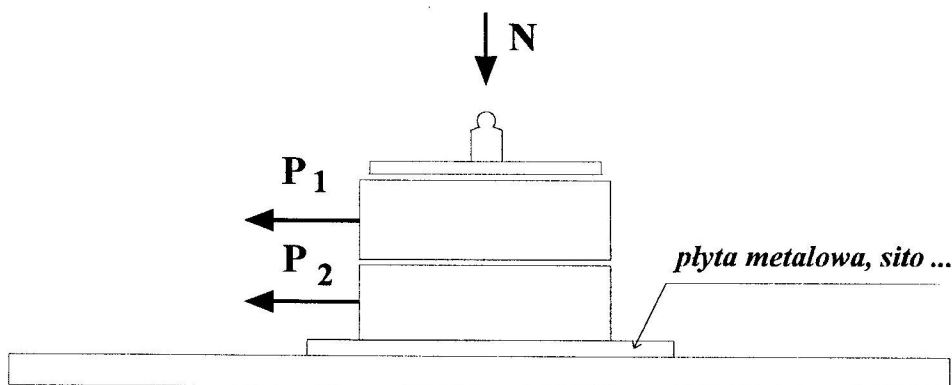
Ze względu na to, że można znaleźć zależności pomiędzy wartościami współczynników tarcia wewnętrznego statycznego i kinematycznego (7) i analogicznie między wartościami współczynników tarcia zewnętrznymi (8) należy brać pod uwagę tylko wartości statyczne tych współczynników.

$$\mu_o = f(\mu_{wk}) \quad (7)$$

$$\mu_o = f(\mu_{zk}) \quad (8)$$

Ze względu na fakt, że istnieje prosta metoda wyznaczania współczynnika tarcia wewnętrznego, należy ją zastosować do oznaczania tej wielkości. Metodą tą jest badanie materiału przez ścinanie bezpośrednie. Dokładny opis tej metody zawarty jest w PN-88/B-04481. Ideę pomiarów przedstawiono na rys. 5. Wartości siły P_1 dotyczą ścinania w płaszczyźnie materiału, a więc wewnętrznego współczynnika tarcia statycznego. Siła P_2 dotyczy natomiast wartości zewnętrznego współczynnika tarcia. Opracowanie natomiast metody wyznaczania wartości współczynnika tarcia zewnętrznego można przeprowadzić tą samą metodą instalując w dolnej celce klocek pokryty siatką o odpowiednich wielkościach oczek.

Jak się w trakcie badań wstępnych okazało, wartości współczynników statycznych wewnętrznego i zewnętrznego (o sito) są liczbowo bardzo zbliżone do siebie. Związane to jest z zapełnianiem otworów sita przez ziarna, przez co tworzy się warstwa podobna do warstwy materiału ziarnistego. W związku z tym, aby nie komplikować wyznaczania tych wielkości przyjęto, że reprezentatywny dla danego materiału jest współczynnik tarcia wewnętrznego statyczny:



Rys. 5

$$\mu_o = a \cdot \mu_{wk} \quad (9)$$

a – współczynnik uogólniający

Pomiary sił ścinających należy dokonywać bez prekondensacji materiału pod najmniejszym z możliwych dla danego materiału obciążeń. Takie warunki są zalecane ze względu na fakt, że wysyp materiału z warstwy przysitowej następuje wówczas, gdy na materiał nie działają żadne siły poza grawitacyjnymi.

Oprócz badania sił ścinających w samym materiale, należało przebadać wartości sił ścinających w przypadku przesuwu materiału ziarnistego po sicie.

Wcześniejsze prace prowadzone w Katedrze Aparatury Procesowej Politechniki Łódzkiej wykazały, że głównym źródłem oporów procesu przesiewania jest sama warstwa ziarnista, a nie sito. Badanie wartości sił ścinających po powierzchni sita ma więc jedynie charakter porównawczy. Ze względu na to, że są to liczbowo wartości zbliżone do wartości sił przy ścinaniu materiału można przyjąć, że te drugie mogą z dobrą dokładnością opisywać dany materiał.

6. BADANIA I ICH WYNIKI

Pierwsze były badania pojemności wodnej materiałów ziarnistych. Badano trzy charakterystyczne materiały ziarniste :

- ziarna kuliste (mieszaniny kul agalitu),
- ziarna nieregularne (piasek),
- ziarna ostrokrawędziowe (kruszywo marmurowe).

Wykonano badania zawartości wilgoci (masa wilgoci do masy suchego materiału ziarnistego) w klasie dolnej i w górnej. Klasy górną i dolną dla trzech modelowych materiałów określono następująco: agalit i kruszywo – klasa dolna o wymiarze poniżej 1 milimetr, piasek – klasa dolna poniżej 0,4 milimetra.

Średnice zastępcze badanych materiałów zmieniały się w granicach :

- ziarna kuliste $0 \leq d_z \leq 3,0$ mm,
- ziarna nieregularne $0 \leq d_z \leq 20$ mm,
- ziarna ostrokrawędziowe $0 \leq d_z \leq 6$ mm.

Badanie pojemności wodnej materiałów ziarnistych metodą statyczną przeprowadzono wg BN-72/0520-08. Zastosowano metodę lejków Büchnera. Przygotowaną próbkę materiału umieszczono w 3 zlewkach o pojemności około 1 dm³, a następnie zalano wodą destylowaną (o temperaturze pokojowej) i wymieszano bagietką w celu uzyskania jednorodnej mieszaniny. Dla uzyskania maksymalnego nasycenia wodą badanego materiału, odstawiono zlewki na około 30 min. Ten stosunkowo długi czas kontaktu pomiędzy fazą wodną a powierzchnią materiału ziarnistego ma na celu uzyskanie pełnej wilgotności badanego materiału. Pojęcie to oznacza proces występowania wody nie tylko na powierzchni ziaren, gdzie jest

utrzymywana przez siły napięcia powierzchniowego, ale także przenikanie wody w kanaliki między ziarnami, co jest powodowane występowaniem sił kapilarnych.

W czasie kontaktu międzyfazowego zachodzi także proces odgazowania, który polega na zastąpieniu miejsca w przestrzeniach między ziarnami dotychczas zajmowanego przez gaz (w naszym przypadku jest nim powietrze) przez wodę. Wszystkie te mechanizmy powodują łączenie się pojedynczych cząstek w większe skupiska i aglomeraty, co w sposób znaczący wpływa na zmianę własności fizycznych w odniesieniu do materiału pierwotnego. Następnie zawartość naczyń przeniesiono ilościowo do 3 lejków Büchnera, których dno zostało przykryte nawilgoconym krążkiem bibuły do sączenia. W celu uniknięcia odparowania wody z powierzchni materiału ziarnistego lejki przykryto wilgotną bibułą. Ociekającą wodę zbierano do podstawionych kolb Erlenmayera. Odciekanie wody uważano za zakończone, gdy przez dwie minuty nie odsączyła się więcej niż jedna kropla (odciekanie trwało około 2 godzin). Po zakończeniu odciekania, zawartość badanego, maksymalnie nasyconego materiału przeniesiono z lejka do uprzednio zważonej parowniczk (z dokładnością do 0,1 g). Następnie zważono parowniczkę wypełnioną wilgotnym materiałem i umieszczono w suszarce komorowej. Materiał suszono w temperaturze 105 ± 2 °C przez czas 20–30 min, zależnie od materiału, do uzyskania stałej masy. Po wyjęciu z suszarki, parowniczkę wraz z suchym materiałem badanym zważono z dokładnością 0,1 g. Za wynik przyjęto średnią arytmetyczną wyników trzech równoległych oznaczeń.

Badanie pojemności wodnej materiałów ziarnistych metodą dynamiczną wykonano przy użyciu wstrząsarki laboratoryjnej.

Przygotowanie próbki materiału do wyznaczenia dynamicznego współczynnika wilgoci odbywało się w taki sposób, jak dla współczynnika statycznego. Po uzyskaniu maksymalnego nasycenia badanego materiału wodą, podzielono go na trzy próbki, a następnie każdą z nich kolejno przenoszono na sito. Wielkość otworów sita dobrano w taki sposób, aby nie następowało odsiewanie się materiału ziarnistego. Pod sitem umieszczono podstawkę, w celu zbierania odciekającej wody. Tak przygotowane sito przenoszono na wstrząsarke i poddawano procesowi odciekania wody, mierząc czas stoperem (5 min). Po zakończeniu odciekania wody, zawartość badanego materiału przenoszono z powierzchni sita do parowniczk. Dalszy ciąg badania przeprowadzano w sposób analogiczny do badania zawartości wilgoci metodą statyczną.

Wyniki tych badań zestawiono w tab. 1 oraz zilustrowano na rys. 6 i 7, dla każdego materiału podano procentowe zmniejszenie zawartości wilgoci względem statycznego współczynnika wilgotności.

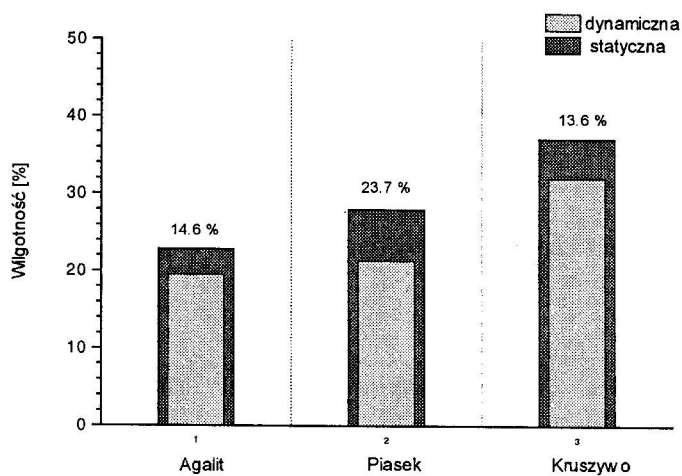
Łatwo zauważyć, że dynamiczna wartość współczynnika wilgoci jest mniejsza od wartości statycznej oraz zależność zawartości wilgoci od wielkości ziarn (składu granulometrycznego).

Wykonano również badania współczynnika tarcia wewnętrznego metodą ściśnięcia bezpośredniego. Metodyka badań współczynnika tarcia (wewnętrznego) i ze-

Tabela 1

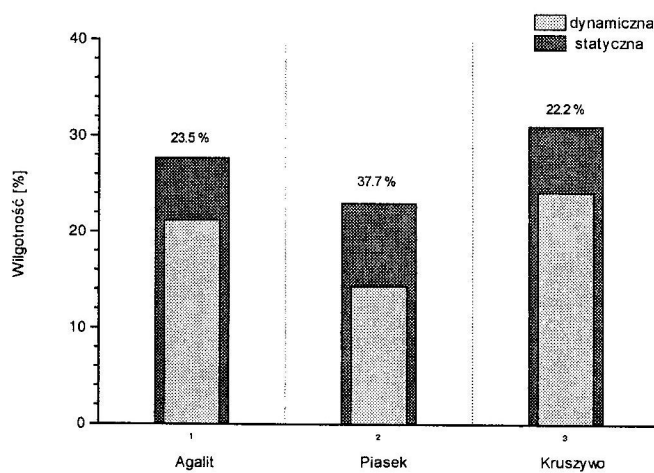
Materiał	$W_s, [\%]$		$W_d, [\%]$	
	K_D	K_G	K_D	K_G
Agalit	22,9	27,7	19,5	21,2
Piasek	28,0	23,0	21,4	14,3
Kruszywo	37,2	31,1	32,1	24,2

Zawartość wilgoci w klasie dolnej



Rys. 6

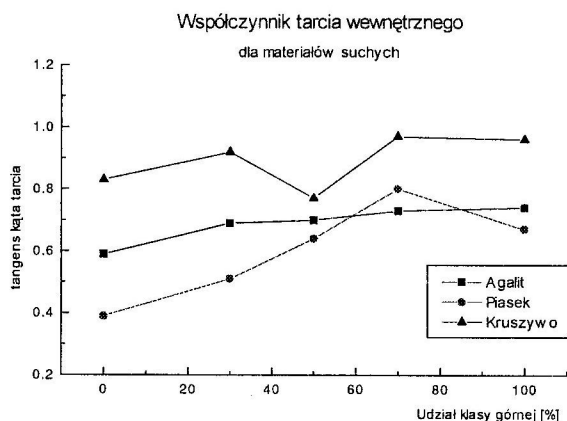
Zawartość wilgoci w klasie górnej



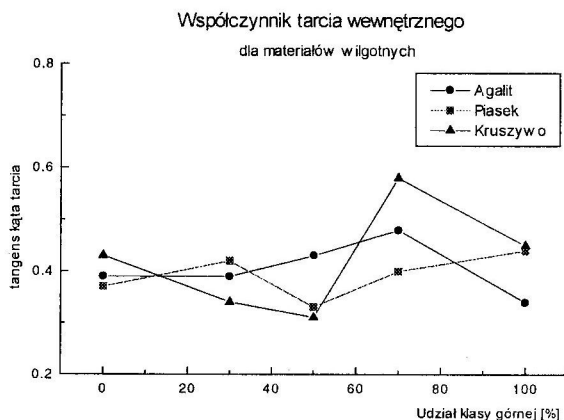
Rys. 7

wewnętrznego) została omówiona w p.5. Badania te wykonano dla materiałów suchych oraz materiałów wilgotnych, gdzie zawartość wilgoci była określana przez statyczny współczynnik wilgoci. Określono współczynnik tarcia jako tangens kąta pomiędzy składową pionową i poziomą siłą podczas ścinania materiału ziarnistego. Badania prowadzono dla zmiennych zawartości klasy górnej (0%, 30%, 50%, 70%, 100%) określonej jak wyżej. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono wyniki tych badań odpowiednio dla materiałów suchych i wilgotnych. Wykresy te zostały sporządzone dla trzech materiałów.

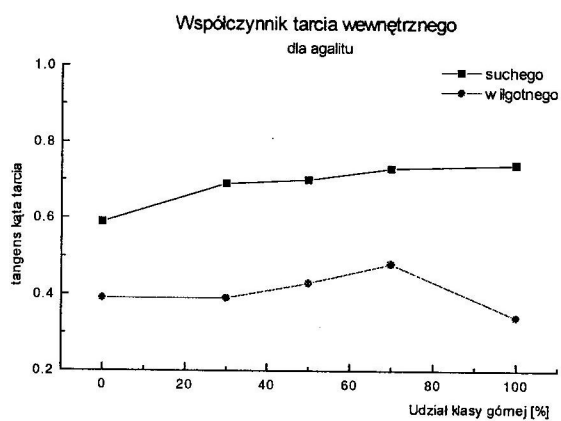
Na wykresach (rys. 10, 11 i 12) zestawiono wartości współczynników tarcia wewnętrznego materiału suchego i wilgotnego dla poszczególnych materiałów. W przypadku materiałów wilgotnych pomiary wykonano w najbardziej skrajnym punkcie nasycenia materiału wilgocią, tj. dla statycznego współczynnika wilgoci. Badania w pozostałym obszarze osi są w trakcie.



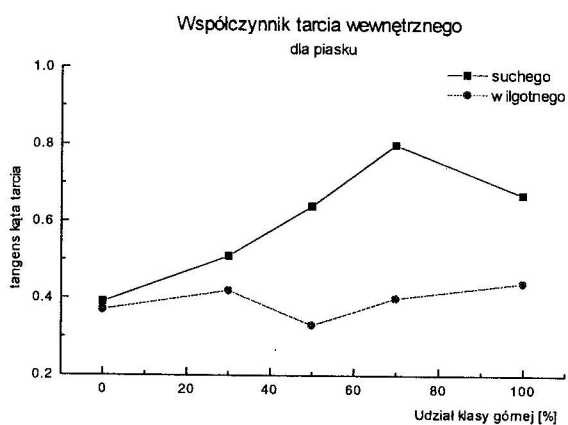
Rys. 8



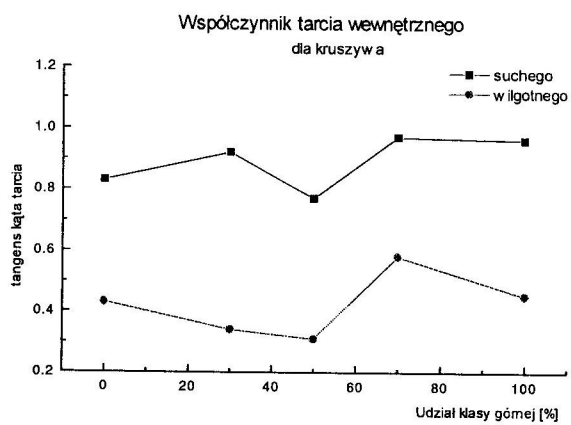
Rys. 9



Rys. 10



Rys. 11



Rys. 12

7. WNIOSKI

Celem niniejszej pracy było wprowadzenie współczynnika tarcia (uogólnionego) jako wielkości mającej istotny wpływ na proces przesiewania materiałów ziarnistych, przy jednoczesnej rezygnacji z określania wpływu wilgoci materiału na proces. A więc zamiast rozpatrywać relację :

wilgotność $\rightarrow$ współczynnik tarcia $\rightarrow$ skuteczna wydajność procesu,
dążymy do ustalenia zależności:

współczynnik tarcia $\rightarrow$ skuteczna wydajność procesu

Opracowana przez autorów niniejszej pracy tzw. iteracyjna metoda wyznaczania powierzchni sit (do tej pory nie publikowana) prowadzi do oszacowania wielkości sita dla danej sprawności (skuteczności procesu) i dla danej wydajności przepustowej maszyny. Odnosi się ona jednak do materiałów suchych – oznaczamy tę wydajność Q_s . Dla materiałów wilgotnych natomiast mamy wydajność Q_w , która jest niższa od Q_s i wynosi:

$$Q_w = Q_s \cdot \xi \quad (10)$$

gdzie współczynnik poprawkowy ξ , zwany czynnikiem lepkości materiału ziarnistego (wprowadzonym przez autorów na użytek tej pracy), będzie wyznaczany z korelacji typu:

$$\xi = f(\mu_o) \quad (11)$$

lub

$$\xi = f(W) \quad (12)$$

Uzyskanie trzech ostatnich zależności (w odniesieniu szczególnie do przesiewania drobnoziarnowego) jest obecnie celem prac autorów.

LITERATURA

- ANDRZEJCZAK P., WODZIŃSKI P. (1994), *Model of Screening in the Layer, Powder Hand. & Process.*; Volume 6, No. 3, Sept.
SZTABA K. (1993), *Przesiewanie*, Katowice, Śląskie Wydawnictwo Techniczne.

Gruszczyński D., Wodziński P., (1995), Moisture and friction of granular materials and screening process, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 29, 183–198 (Polish text)

The aim of this study was to introduce the generalized friction coefficient as a parameter which has a significant influence on screening of granular materials. An iterative method for determination of sieve surface area, developed by the authors, was used to estimate the sieve size necessary to achieve a specified process efficiency and to be taken into account in the determination of the effect of moisture on the screening process for a given machine throughput. An axis was introduced on which boundaries of different types of screening (dry, wet, and dewatering) were marked. Using the method of water capacity of model granular materials, a boundary between dewatering and wet screening was determined. Studies on shearing of granular materials allowed the determination of the coefficients of internal friction (identified with the generalized friction coefficient) and the moisture content in the granular material to be taken into account in relation to the screening process.

The present paper is part of an extensive study on screening of model wet granular materials.