

## PNEUMATYCZNE WSPOMAGANIE PROCESU PRZESIEWANIA MIESZANIN ZIARNISTYCH NA PRZESIEWACZU PŁASKIM

Stefan Feder, Włodzimierz Kęska, Konrad Włodarczyk

*Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska*

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i empirycznych, zmierzających do wyznaczenia wpływu przepływającego przez powierzchnię sitową strumienia powietrza na intensywność procesów przesiewania materiałów ziarnistych. Badania symulacyjne dotyczyły wyidealizowanego materiału ziarnistego, badania empiryczne przeprowadzono na ziarnach kruszywa mineralnego. Potwierdzono hipotezę, że przy dostatecznie wysokiej częstotliwości drgań sita strumień przepływającego powietrza znacznie podwyższa intensywność przesiewania.

**Słowa kluczowe:** przesiewanie, materiał ziarnisty, sito, symulacja komputerowa

### Wprowadzenie

Ziarnem nazywamy element stałego ośrodka rozproszonego, ograniczony zamkniętą powierzchnią o dowolnym kształcie. Nazwa ziarno wywodzi się z rolnictwa, gdzie nazywa się tak masę złożoną z tzw. ziarniaków roślin z rodziny traw (Gramineae), często niepoprawnie zwanych ziarnami. W tym artykule jednak ta nazwa jest używana w tym pierwszym, bardziej ogólnym znaczeniu. Typową operacją technologiczną, jakiej podlegają mieszaniny ziarniste, jest przesiewanie. Przesiewanie mieszanin ziarnistych występuje niemal we wszystkich dziedzinach przemysłu i gospodarki, takich jak: rolnictwo, hutnictwo, przemysł wydobywczy spożywczy, chemiczny, farmaceutyczny czy budowlany [Sztaba 1993]. Głównym celem procesu przesiewania, jako procesu klasyfikacji ziarnowej, jest wyodrębnienie z danego materiału klasy ziarnowej w założonych granicach wymiarowych. W najprostszym przypadku może to być klasa tylko o jednej, ściśle określonej granicy: górnej lub dolnej.

Podstawą realizacji przesiewania jest doprowadzenie wszystkich ziaren przesiewanego materiału do kontaktu z powierzchnią stałą (sitem), z otworami o określonym kształcie i wymiarach zależnych od wybranej wartości granicy klasy, jaką zamierzamy wydzielić z przesiewanego materiału. Przesiewanie jest procesem losowym zachodzącym dzięki działaniu sił grawitacji, przez co jego intensywność jest zwykle niedostateczna. Zwiększenie intensywności przesiewania pozwala na ograniczenie powierzchni sit i tym samym znaczne oszczędności. W przemyśle kruszyw budowlanych usiłuje się przyspieszać przesiewanie poprzez stosowanie przemywania sit strumieniem wody, co w odniesieniu do ziaren pochodzenia roślinnego i innych materiałów wrażliwych na działanie wody, jak np.

nawozy mineralne, jest z oczywistych względów niemożliwe. Powstała hipoteza, że efekt podobny do efektu przemywania sita strumieniem wody, można będzie osiągnąć zastępując strumień wody strumieniem powietrza. Hipotezę tę można wyprowadzić z następującego rozumowania: Podrzucone przez drgające sito ziarna napotkają na siłę grawitacji oraz opór aerodynamiczny powietrza. Siła aerodynamiczna działa skuteczniej na ziarna drobne, co wynika z dość oczywistych zależności pomiędzy wymiarem cząstki a stosunkiem sił bezwładności do sił oporu aerodynamicznego. Jest to fizyczna podstawa sortowania w strumieniu powietrza. W trakcie wysokiego podrzutu mamy zatem do czynienia z wstępnym, pneumatycznym sortowaniem warstwy ziaren. Dodatkowym czynnikiem, który będzie sprzyjał przesiewaniu jest zabieranie ziaren drobnych przez strumień powietrza przepływający przez otwory sita. Czynnikiem ułatwiającym przesiewanie będą zatem wysokie podrzuty materiału na sicie, co wymaga zwiększania przyspieszenia ruchu sita, tj. amplitudy i częstotliwości jego drgań. Czynnikiem utrudniającym przesiewanie może być jednak zamykanie otworów sita, przez tzw. ziarna trudne, łatwo utykające w otworach sita. W obszernej literaturze przedmiotu nie znaleziono wyników badań, które by weryfikowały przedstawioną wyżej hipotezę i pozwalały określić zakres racjonalnego doboru parametrów przesiewacza ze wspomaganiem pneumatycznym, takich jak częstotliwość i amplituda ruchu sita, czy prędkość przepływu powietrza przez sito. Problemem tym zajmują się od kilku lat autorzy niniejszego artykułu [Kęska i in. 2005; Kęska i in. 2006].

## Cel badań

Zasadniczym celem badań było dokładniejsze sprawdzenie hipotezy, że przepływ powietrza z górnej na dolną stronę sita, przy podwyższeniu częstotliwości drgań sita i optymalnym doborze pozostałych parametrów procesu przesiewania: takich jak: kąt nachylenia sita, kierunek i amplituda jego drgań, pozwoli na znaczące zwiększenie intensywności przesiewania przy sortowaniu mieszanin ziarnistych, a w szczególności kruszywa mineralnego stanowiącego tu materiał na którym prowadzono badania empiryczne. Założono, że kruszywo może być traktowane jako modelowa mieszanina ziarnista, a zweryfikowane w wyniku tych badań prawidłowości, będzie można uogólnić również na inne mieszaniny ziarniste, w tym nawozy granulowane czy też mieszaniny pochodzenia roślinnego. Weryfikacja hipotezy ogólnej została wstępnie przeprowadzona na uogólnionym modelu matematycznym procesu przesiewania dowolnej mieszaniny ziarnistej, jednak dopiero eksperyment fizyczny na modelu przesiewacza i wybranym materiale ziarnistym, daje pełniejsze potwierdzenie przedstawionej powyżej hipotezy. Założono, że szerszy eksperyment czynnikowy pozwoli na opracowanie metodyki racjonalnego doboru parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych dla przesiewacza ze wspomaganiem pneumatycznym. Do tego też celu służą również równoległe rozwijane symulacyjne metody badania procesów przesiewania wibracyjno-pneumatycznego.

## Materiał i metody

**Eksperymenty numeryczne.** Badania symulacyjne na modelu numerycznym przeprowadzono za pomocą specjalnie napisanego w języku Delphi™ programu komputerowego, z wykorzystaniem tzw. metody elementów dyskretnych (DEM). Metoda ta polega na cał-

kowaniu układu równań różniczkowych zwyczajnych, opisujących ruch swobodnego układu brył materialnych w przestrzeni kartezjańskiej, które mogą oddziaływać na siebie jednostronnymi lub dwustronnymi więzami różnej natury fizycznej: siłami kontaktowymi, elektrostatycznymi czy adhezyjnymi. Możliwe jest też badanie oddziaływań aerodynamicznych, co było też głównym celem niniejszej pracy. Jednym z pierwszych przykładów zastosowania tej metody jest praca Li i współpracowników, w której nie zajmowano się jednak badaniem wpływu przedmuchu powietrza przez sito a sito było traktowane jako nieruchome [Li i in. 2003]. Ze względu na czasochłonność obliczeń metodą DEM, model matematyczny mieszaniny ziarnistej zredukowano do układu kulek o założonej gęstości i składzie granulometrycznym, przesiewanych przez wąski wycinek sita złożonego z okrągłych prętów. Przesiewaniu podlega niewielka grupa ziaren (granul) (150). Sito wykonuje ruch drgający o założonej w programie amplitudzie i częstotliwości. W efekcie symulacji można wyznaczyć, w dowolnej chwili czasu trwania procesu przesiewania, liczbę ziaren które przeszły przez otwory sita. Symulację prowadzono do czasu przesiania 70% z frakcji podwymiarowej (ziaren wymiarze mniejszym od otworu sita). mieszaniny podanej na sito na początku procesu. Stosunek masy przesianych ziaren do tego czasu może być zatem traktowany jako miara średniej intensywności przesiewania, którą definiujemy tu jako pochodną masy przesianych ziaren względem czasu. Eksperyment numeryczny prowadzono dla różnych kombinacji amplitudy, częstotliwości, prędkości powietrza i różnych proporcji głównych frakcji mieszaniny ziarnistej, a także różnych sposobów ułożenia ziaren na początku procesu przesiewania.

### **Badania empiryczne**

Badania empiryczne, których program ustalono kierując się wynikami eksperymentu numerycznego, przeprowadzono na specjalnie zbudowanym stanowisku laboratoryjnym. Zasadniczym elementem tego stanowiska było rzeszoto z pojedynczym wymiennym sitem o wymiarach 300x400 mm. Rzeszoto było zamontowane na dwóch prowadnicach, w ten sposób, że można było zmieniać kąt jaki tworzy płaszczyzna sita z osią prowadnic wyznaczającą kierunek drgań sita. Prowadnice te były zamontowane do ramy stanowiska przegubowo, dzięki czemu istniała możliwość zmiany ich położenia kąтового względem pionu. Na górnym końcu prowadnic zamontowano silnik napędowy z mechanizmem korbowym o zmiennym wykorbieniu, co pozwalało na zmianę amplitudy drgań sita. Częstotliwość drgań sita zmieniano płynnie dzięki zastosowaniu zasilania silnika asynchronicznego przez falownik sterowany mikrosterownikiem. Pod rzeszotem umieszczono szczelną komorę zbiorczą, połączoną z rzeszotem elastycznym rękawem uszczelniającym. Do komory tej podłączono wentylator ssący wymuszający przepływ powietrza przez otwory sita. Prędkość powietrza regulowano przepustnicą i mierzono przepływomierzem turbinkowym. Przesiewacz zasilano materiałem z krótkiego przenośnika taśmowego napędzanego silnikiem prądu stałego o regulowanej prędkości obrotowej. Jako materiału do badań użyto mieszaniny dwóch frakcji żwiru łamanego ze skał węglanowych o gęstości usypowej  $2,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Zakres wymiarowy frakcji ziaren podwymiarowych wynosił 1-4 mm zakres wymiarowy frakcji nadwymiarowej wynosił 5-10 mm. Przez frakcję nadwymiarową rozumie się tutaj ziarna o wymiarze umożliwiającym przechodzenie przez otwory sita, frakcja nadwymiarowa to ziarna nie mieszczące się w otworze sita. W obrębie tych przedziałów

rozkład wymiarów ziaren był w przybliżeniu równomierny. Każdą frakcję kruszywa zabarwiono na inny kolor, celem łatwego ich rozróżnienia. Dokładna charakterystyka wymiarowa obu frakcji kruszywa została określona metodą fotogrametryczną i zamieszczona w szczegółowym raporcie z badań. Badania empiryczne przeprowadzono na trzech mieszankach o następujących proporcjach frakcji nadwymiarowej i podwymiarowej: 20% : 80% ; 80% : 20% i 50% : 50% . Przed rozsypaniem warstwy materiału na taśmie przenośnika zasilającego porcję materiału dokładnie mieszano metodą stożka, poprzez trzykrotne przesypania próbki z jednej kuwety do drugiej, w taki sposób, aby utworzyła ona swój naturalny stożek usypowy.. Po rozsypaniu kruszywa na taśmie przenośnika następowało włączenie napędu wprawiającego sito w ruch wibracyjny i po odczekaniu aż osiągnię on zadaną prędkość obrotową załączany był silnik napędzający taśmę przenośnika. Po nadaniu przez przenośnik całej masy próbki następowało wyłączenie jego napędu, po czym odczekiwano do zakończenia procesu przesiewania. Po przesianiu zadanej porcji materiału sito wyjmowano z rzeszota i oczyszczano przed kolejną próbą. Odseparowaną w komorze zasypowej kosza część masy ziarnistej ważono i ponownie mieszano z pozostałą jej częścią metodą opisaną powyżej.

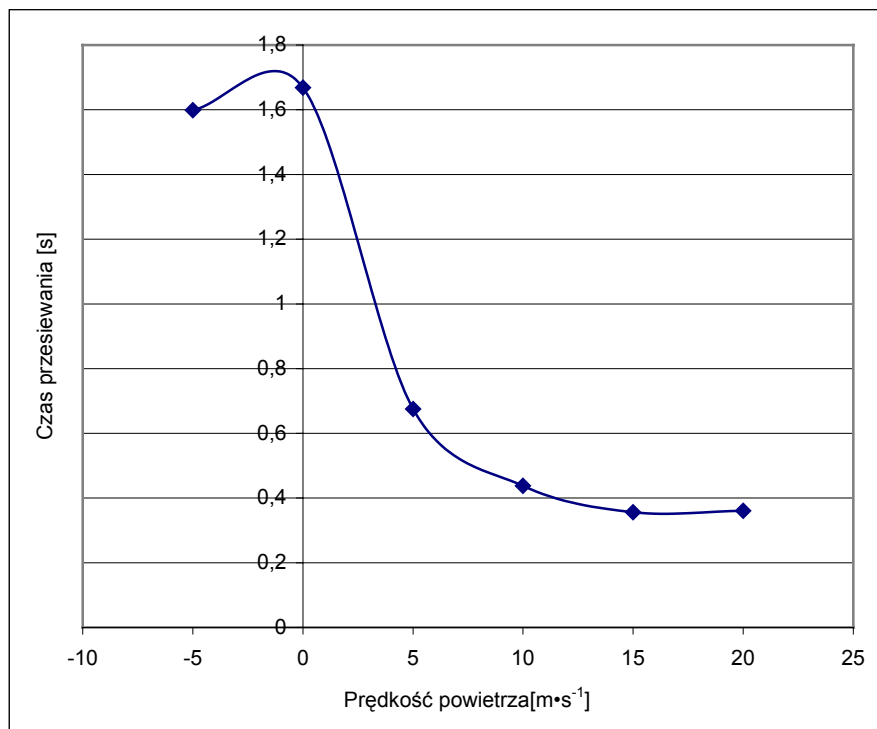
Dla wszystkich założonych w programie badań kombinacji czynników (zmiennych eksperymentu) przesiewanie prowadzono w dwóch wariantach: ze wspomaganie strumieniem powietrza i bez wspomaganie przy wyłączonym wentylatorze. Ten drugi przypadek traktować należy jako tzw. próbę kontrolną. Próby przesiewania powtarzano trzykrotnie.

## Wyniki badań

### Eksperyment numeryczny

W wyniku realizacji programu eksperymentów numerycznych, uzyskano obszerny zbiór danych, na podstawie których można było łatwo wyznaczyć zależności czasu przesiewania założonej ilości ziaren podwymiarowych (70% wartości początkowej) z mieszanki o stałym składzie granulometrycznym, od częstotliwości, amplitudy i prędkości przepływu powietrza. Czas ten może być traktowany jako miernik intensywności procesu przesiewania. Dodatkowo wartości prędkości powietrza odpowiadają kierunkowi przepływu powietrza z górnej na dolną stronę sita, wartości ujemne kierunkowi odwrotnemu.

W zakresie niskich częstotliwości drgań rzeszota, przepływ powietrza wywierał niekorzystny skutek i czas przesiewania założonej porcji ziaren drobnych wzrastał wraz ze wzrostem prędkości powietrza. Dopiero podniesienie częstotliwości drgań sita powyżej pewnej wartości granicznej skutkowało odwróceniem tej zależności, tj. wzrost prędkości powietrza powodował znaczne skrócenie czasu odsiewania ziaren drobnych, a tym samym podwyższenie intensywności przesiewania. Widać to wyraźnie na wykresie przedstawionym na rysunku 1. Dzieje się tak jednak tylko do osiągnięcia pewnego optimum częstotliwości, po czym intensywność przesiewania zaczyna nieznacznie spadać, prawdopodobnie w wyniku zasysania ziaren grubych do otworów sita. Istnieje zatem optymalna prędkość przedmuchu charakterystyczna dla danej częstotliwości ruchu sita. Praktycznie, za wystarczającą do zintensyfikowania przesiewania można uznać prędkość powietrza ok.  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Powyżej  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  wzrost prędkości powietrza nie daje już wzrostu intensywności przesiewania (spadku czasu odsiewania drobnych ziaren). Nadmierne podnoszenie tej prędkości prowadzi do znacznych strat energii.



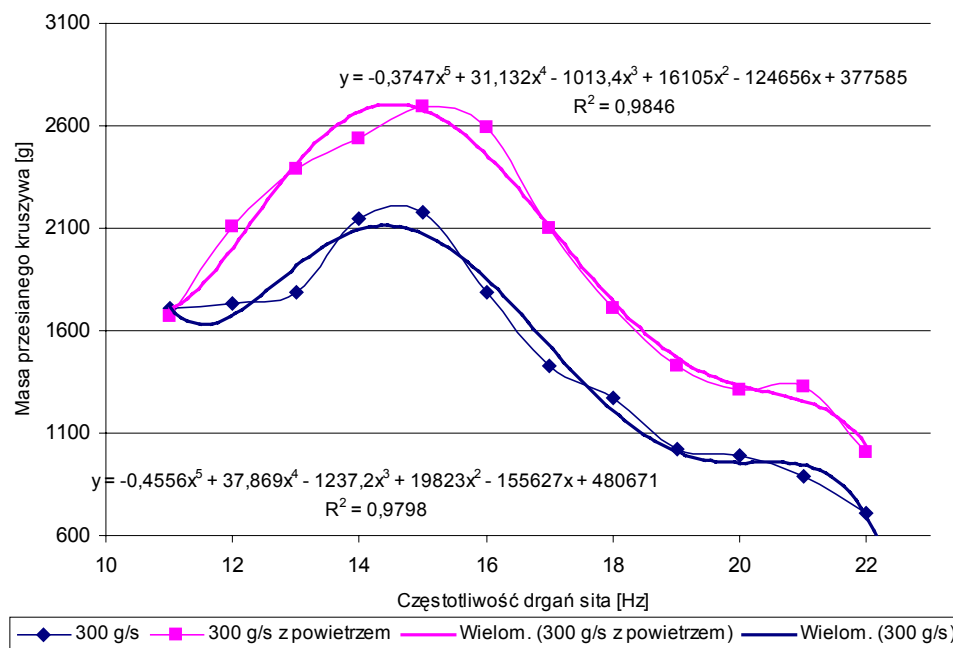
Rys. 1. Wyniki symulacyjnego badania wpływu prędkości przedmuchiwania powietrza na czas odsiewania 70% frakcji podwymiarowej. Częstotliwość drgań sita 25 Hz, amplituda 10mm, średnica drutu sita 5 mm, wymiar otworu sita 3,5 mm, udział frakcji podwymiarowej: 50%, wymiar ziaren frakcji podwymiarowej 3 mm, wymiar ziaren frakcji nadwymiarowej 8 mm

Fig. 1. Results of the simulative study of the effect of airflow rate on the time needed to screen 70% of the undersize fraction. Screen vibration frequency 25 Hz, amplitude 10 mm, screen wire diameter 5 mm, screen hole size 3.5 mm, undersize fraction share: 50%, undersize fraction grain size 3 mm, oversize fraction grain size 8 mm

Jakkolwiek badania symulacyjne potwierdziły poprawność założonej hipotezy, dopiero badania empiryczne prowadzone na stanowisku odwzorowującym rzeczywiste warunki przesiewania na przesiewaczach przemysłowych mogły dać pełniejsze rozstrzygnięcie postawionego problemu. W tym przypadku mamy bowiem do czynienia z ciągłym przepływem materiału wzdłuż sita.

Program tych badań zakładał wyznaczenie wpływu częstotliwości i amplitudy drań sita, kąta jego pochylecia i kierunku drgań, a także składu granulometrycznego mieszaniny ziarnistej na intensywność przesiewania z zastosowaniem i bez zastosowania strumienia powietrza. Przeprowadzono ogółem kilkaset prób przesiewania z różnymi kombinacjami tych czynników. Z uwagi na ograniczoność miejsca poniżej zaprezentowano wyniki tylko jednej wybranej serii prób, która ma jednak znaczenie reprezentatywne.

Na rysunku 2 uwidoczono zależność masy przesianego materiału, która pozostaje w ścisłym związku z intensywnością przesiewania, od częstotliwości drgań sita. W tym przypadku nie było bowiem możliwości dokładnego pomiaru czasu przesiewania, tak jak w badaniach symulacyjnych.



Rys. 2. Zależność masy przesianej od częstotliwości drgań sita dla natężenia zasilania  $300 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ , z udziałem i bez udziału strumienia powietrza. Amplituda 3 mm, mieszanka o składzie 50% : 50%

Rys. 2. Dependence of the sieved mass on the screen vibration frequency for the feed intensity  $300 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ , with and without the participation of airflow. Amplitude 3 mm, 50%:50% mixture composition

Z przedstawionego rysunku wyraźnie widać, że powyżej częstotliwości ok 11 Hz zastosowanie przedmuchu powietrza górnej strony sita na dolną w znacznym stopniu poprawia przesiewanie. Porównując inne otrzymane, ale nie przytoczone tutaj wyniki badań, uzyskane dla różnych wariantów kąta ustawienia sita, można było stwierdzić, że większą efektywność procesu przesiewania otrzymuje się przy dodatnim ustawieniu kąta pochylenia sita (za dodatni kąt pochylenia sita przyjmuje się przypadek, kiedy sito jest pochylone zgodnie z kierunkiem przepływu materiału na sicie, czyli w dół). Można to wytłumaczyć tym, że poziome ustawienie sita, podobnie jak ujemny kąt kierunku drgań sita (za ujemny kąt kierunku drgań sita przyjmuje się taki kąt, przy którym sito w ruchu do góry ma składową poziomą prędkość skierowaną przeciwnie do kierunku przepływu materiału na sicie),

zmniejsza prędkość transportu materiału na powierzchni sita, powodując tym samym zwiększenie grubości warstwy materiału na sicie, a to powoduje utrudnienie przesiewania.

## Podsumowanie

Badania symulacyjne prowadzone na abstrakcyjnym materiale ziarnistym pokazują, że istnieje możliwość znacznego podwyższenia intensywności przesiewania materiału ziarnistego na sicie drgającym, poprzez zastosowanie wspomaganie pneumatycznego, polegającego na wymuszeniu ruchu powietrza z górnej na dolą stronę sita. Korzystny efekt tego wspomaganie występuje dopiero po przekroczeniu granicznej częstotliwości drgań sita, która daje dostatecznie duże przyspieszenie, zapobiegające zamykaniu otworów sita przez przyspane ziarna nadwymiarowe.

Przeprowadzona na stanowisku laboratoryjnym badania doświadczalne, pozwoliły empirycznie potwierdzić powyższą hipotezę w warunkach przesiewania w ruchu ciągłym, dla mieszanek kruszywa mineralnego o uziarnieniu odpowiadającym frakcji żwirowej. Można się spodziewać, że ten korzystny efekt wystąpi również dla innych mieszanin ziarnistych, w tym mieszanek nasion roślinnych charakteryzujących się niższą gęstością i lepszą przesiewalnością niż kruszywo mineralne i zbliżonym składem granulometrycznym.

Przesiewanie na sicie pracującym w ruchu ciągłym pogarsza się wraz ze wzrostem częstotliwości drgań sita powyżej wyznaczonej w badaniach wartości optymalnej. Wynika to z faktu, że przy wyższej prędkości sita podrzuty materiału są wysokie i w związku z tym liczba kontaktów materiału z sitem zmniejsza się. Przy zastosowaniu strumienia powietrza skierowanego w dół, prędkość opadania materiału na sito wzrasta, dzięki czemu częstość kontaktu ziarna z powierzchnią sita zwiększa się wraz ze wzrostem częstotliwości drgań sita i ta optymalna częstotliwość może być wyższa.

## Bibliografia

- Li J., Webb C., Pandiella S.S., Campbell. G.M. 2003. Discrete particle motion on sieves – a numerical study using the DEM simulation. *Powder Technology*, 133. s. 190-203.
- Sztaba K. 1993. Przesiewanie. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.
- Kęska W., Feder S., Włodarczyk K. 2005. Badania procesu separacji kruszyw mineralnych. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. Vol.50, nr 2. s. 35-39.
- Kęska W., Feder S., Włodarczyk K. 2006. Modelowanie procesu przesiewania ziarna przez sito ze wspomaganie pneumatycznym. *Materiały X Międzynarodowego Sympozjum im. Prof. Cz. Kanafojskiego nt: Problemy budowy oraz eksploatacji maszyn i urządzeń rolniczych*. s. 101-102.

## **PNEUMATIC AIDING OF THE PROCESS OF SCREENING GRANULAR MIXTURES USING A SCREENING TABLE**

**Abstract.** The paper presents the results of simulative and empirical studies, the objective of which was to determine the effect of an air stream flowing through the sieve area on the intensity of granular material screening processes. The simulative studies concerned idealized granular material, the empirical studies dealt with mineral aggregate. The hypothesis that at sufficiently high screen vibration frequency the flowing air stream considerably increases the screening intensity was confirmed.

**Key words:** screening, granular material, sieve, computer simulation

**Adres do korespondencji:**

Stefan Feder; e-mail: stefan.feder@put.poznan.pl

Zakład Maszyn Roboczych

Politechnika Poznańska