

*przesiewacze wielopokładowe, symulacja,
sprawność, optymalizacja*

Jerzy MALEWSKI¹

STEROWANIE PROCESEM PRZESIEWANIA W PRZESIEWACZACH WIELOPOKŁADOWYCH

Eksperymenty symulacyjne są skutecznym sposobem rozpoznania i sterowania procesem przesiewania na przesiewaczu wibracyjnym wielopokładowym. Parametrem sterującym jest wielkość oczka sita. W publikacji przedstawiono wyniki eksperymentów cyfrowych przesiewania na dwóch przesiewaczach wibracyjnych 3-pokładowych. Każdy pokład traktowano jako posobny układ sześciopodziałowy sit o jednakowych lub zróżnicowanych średnicach oczek. Wykonano obliczenia w 3 wariantach: nominalnych, zróżnicowanych i powiększonych średnicach oczek sit w poszczególnych pokładach i segmentach. Pokazano rozkład sprawności i obciążeń względnych wzdłuż drogi przesiewania oraz efekty końcowe klasyfikacji w postaci rozkładów uziarnienia produktów finalnych. Efekt przesiewania mierzono syntetycznym wskaźnikiem jakości produktów. Obliczenia oparto na modelach sprawności przesiewania, zależnej od parametrów geometrycznych i dynamicznych klasyfikatora oraz obciążenia i składu ziarnowego nadawcy.

1. WSTĘP

Jakość kruszyw to – poza cechami fizycznymi, na które nie ma wpływu technologia przeróbki (gęstość, wytrzymałość, porowatość... skał) – odpowiedni skład ziarnowy i kształt ziaren. Pominiemy tu problem kształtu ziaren, który jest odrębnym zagadnieniem i skoncentrujemy się na sterowaniu składem ziarnowym produktów przeróbki. Dlaczego jest to tak ważne zagadnienie? Dlatego, że odbiorca kruszyw, czyli budownictwo przemysłowe i drogowe, używa tego materiału jako podstawowego

¹ Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej, jerzy.malewski@pwr.edu.pl
doi: 10.5277/mscma1622309

składnika konstrukcyjnego betonów, nawierzchni drogowych, prefabrykatów, gdzie skład ziarnowy szkieletu skalnego odgrywa ważną rolę jakościową i dobierany jest wg ściśle określonych receptur. Takie mieszanki najłatwiej uzyskuje się przez odpowiednie kompozycje wąskich klas ziarnowych.

Na rynku kruszyw, w obrocie handlowym ustalono standardy wymiarów tych klas, np. 2-5, 5-8, 8-11, 11-16, 16-22. Ale sortowanie kruszywa na klasy o szerokości 3 mm jest wyzwaniem technologicznym i technicznym dla instalacji przeróbczych i technologii produkcji.

A jak sobie radzi z tym problemem przemysł? Ogólnie biorąc z trudem. Wysiłki projektantów technologii i techniki idą w kierunku stosowania urządzeń o większej sprawności przesiewania, albowiem to sprawność przesiewania jest głównym czynnikiem odpowiedzialnym za jakość separacji/sortowania ziaren wg ich wymiarów.

Z kolei na sprawność przesiewania ma wpływ wiele czynników:

- środowiskowych (skład ziarnowy, natężenie i wilgotność nadawy, kształt ziaren),
- technicznych – parametrów geometrycznych i dynamicznych przesiewacza: wymiary, nachylenie, średnice oczek, światło sita, częstotliwość i amplituda drgań.

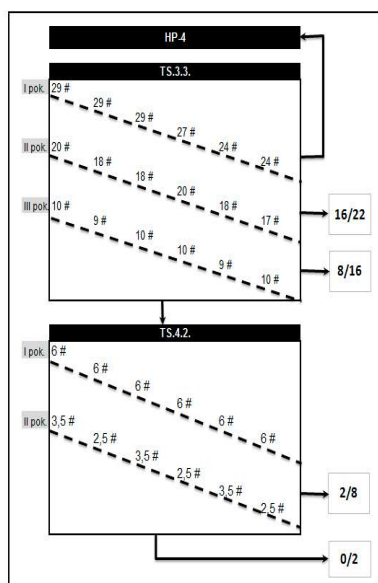
Konstruktorzy przesiewaczy nie ustają w pomysłach i próbach zwiększenia sprawności przesiewaczy przez innowacje konstrukcyjne geometrii sit, jak i sposobu ich poruszania, lokalizując napędy w różnych punktach rzeszota w nadziei na zwiększenie intensywności i wydajności procesu przesiewania. Dobrym przykładem na to jest aktywność łódzkiego ośrodka akademickiego (Ławińska i in. 2014). Ale patrząc historycznie i praktycznie na efekty rozwoju techniki przeróbki surowców mineralnych w zakresie przesiewania wciąż najlepszym pod względem ekonomicznym rozwiązaniem (wykonanie, obsługa, wydajność, koszty) pozostaje klasyczny nadsobny układ sit płaskich wprawiany w ruch drgający, kołowy lub liniowy, zależnie od rodzaju układu napędowego rzeszota. Na ten temat jest dostępna ogromna wiedza praktyczna i teoretyczna², na co wypada zwrócić uwagę współczesnej generacji polskich pracowników nauki i przemysłu. Jedyną przewagą współczesności nad historią w rozwoju przedmiotowej wiedzy są dzisiejsze możliwości prowadzenia cyfrowych eksperymentów symulacyjnych. Jest to właśnie kierunek badań prezentowany w niniejszym artykule.

Uwagę skoncentrujemy na badaniach możliwości poprawy jakości produktów przesiewania w wielopokładowych przesiewaczach przez manipulowanie wielkościami oczek sit na długości pokładów sitowych. Jest to w zasadzie jedyny dostępny technologom produkcji sposób na sterowanie jakością procesu produkcyjnego, co odbywa się na drodze prób i błędów i jest kosztownym sposobem optymalizacji tego procesu.

² Warto przywołać tylko niektóre nazwiska: Czeczott, Gaudin, Taggart, Dietrych, Andrejev, Sztaba, Razumov, Olewski, Banaszewski, Lynch, Whiten, Austin, Herbst, Schubert, Fuerstenau, Wills etc.

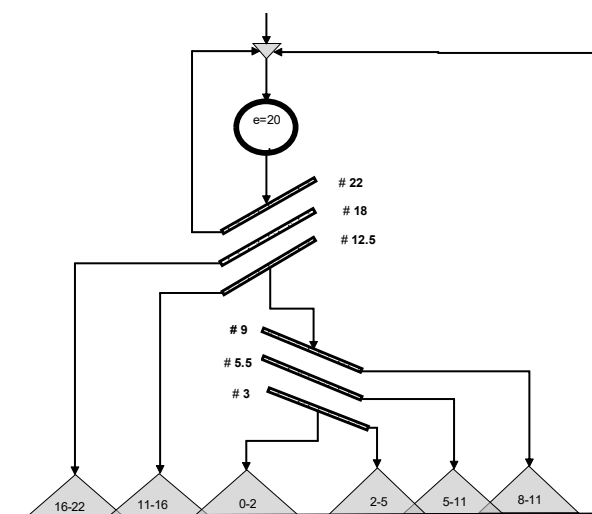
Jednocześnie trzeba wyraźnie podkreślić, że nie ma technicznej możliwości prześledzenia i oceny zjawiska przesiewania w takim przesiewaczu w warunkach produkcyjnych lub laboratoryjnych. Jedynym rozwiązaniem pozostaje eksperymentowanie cyfrowe oparte na modelowaniu pojedynczych operacji przesiewania i analizy/symulacji tego procesu w różnych złożonych konfiguracjach układów operacji.

A jak sobie radzi z tym zagadnieniem przemysł można zobaczyć na rysunku 1 i 2, ilustrujących przykłady wzięte z aktualnej praktyki produkcyjnej. Na rysunku 1 widzimy dość osobliwą (jak się zdaje) sekwencję otworów sitowych, w przeciwieństwie do sytuacji pokazanej na rysunku 2. Właśnie ten ostatni przykład posłuży jako model do analizy jakościowo-ilościowej procesu przesiewania, aby za pomocą eksperymentów symulacyjnych zobaczyć, co tak naprawdę dzieje się na wszystkich sitach jednocześnie w trakcie przepływu materiału po sicie.



Rys. 1. Przykład z praktyki produkcyjnej

Fig. 1. Example from some actual practice



Rys. 2. Analizowany układ przesiewaczy i jego produkty handlowe

Fig. 2. Flowsheet of the analyzed screening system and its market products

Problem ten został już poruszony w kilku artykułach (Malewski & Baszczyńska 2013; Malewski 1988), ale tym razem jest to badanie procesu pod kątem jego efektywności dla większego układu sit, użycia zaawansowanych modeli przesiewania oraz wykorzystania nowej syntetycznej miary oceny procesu.

2. MODEL OPERACJI PRZESIEWANIA

Aby kontrolować *off-line* proces przesiewania na sicie w granicach zdefiniowanych normami klas ziarnowych potrzebna jest znajomość sprawności przesiewania i natężenia strumienia nadawy Q_0 . W takim razie wydajność produktu podsitowego w klasie ziaren d_{min} - d obliczymy następująco

$$Q_1(d_{min}, d) = Q_0(d_{min}, d) \cdot E(d_{min}, d) \quad (1)$$

przy czym sprawność wydzielenia/przesiania produktu podsitowego w granicach wielkości ziaren d_{min} - d wyniesie

$$E(d - d_{min}) = \frac{1}{F(d) - F(d_{min})} \int_{d_{min}}^d s(x, \mathbf{m}) dF(d), \quad \begin{matrix} x = d / d_s \\ d_{min} < d \leq d_s \end{matrix} \quad (2)$$

gdzie:

- $\mathbf{m}$ – wektor parametrów statycznych i dynamicznych przesiewacza,
- A – współczynnik poprawkowy na błąd sumowania (≈ 1),
- d_s – średnica oczka sita,
- $s(x, \mathbf{m})$ – skuteczność przesiewania wąskiej klasy ziarnowej,
- $F(d)$ – funkcja krzywej składu ziarnowego nadawy.

Wystarczy zatem znać postać funkcji $s(x, \mathbf{m})$, aby obliczyć skuteczność przesiewania, skład ziarnowy i wydajność każdego z produktów operacji dla dowolnego zbioru ziaren nadawy, opisującego się rozkładem prawdopodobieństwa $F(d)$.

Wiarygodność wyników uzyskanych z eksperymentów symulacyjnych zależy od jakości modeli matematycznych, ściślej – modelu $s(x, \mathbf{m})$ funkcji sprawności przesiewania ziaren o wielkości względnej $x = d/d_s$. Identyfikacja tej funkcji to główny kierunek badań teoretycznych i laboratoryjnych drugiej połowy XX wieku, wyniki których są obecnie zakodowane we współczesnych programach komputerowych do analiz/optymalizacji procesów i systemów³. Podobne badania były w tym okresie prowadzone także w Instytucie Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, a ich wyniki znajdują się w rozprawie (Krawiec 1979) lub we wcześniejszych publikacjach autora (Malewski 1988).

Najlepiej udokumentowanym teoretycznie modelem sprawności jest funkcja

$$s(x, \mathbf{m}) = 1 - \exp(-\lambda t), \quad \lambda > 0 \quad (3)$$

którą można wyprowadzić opisując proces przesiewania równaniem różniczkowym I stopnia lub znanym z fizyki i biologii procesem narodzin i śmierci albo procesem stochastycznym Markowa itp. (Malewski 1981; Drzymała 2007). Taką właśnie funkcję użyto do obliczeń, a parametr $\lambda = f(x, \mathbf{m})$ jest tu parametrem zwanym intensywno-

³ ModSim®, JKSimMet® i podobne programy używane w nauce, przemyśle i biurach projektowych i handlowych grupy producentów Metso lub Sundvick.

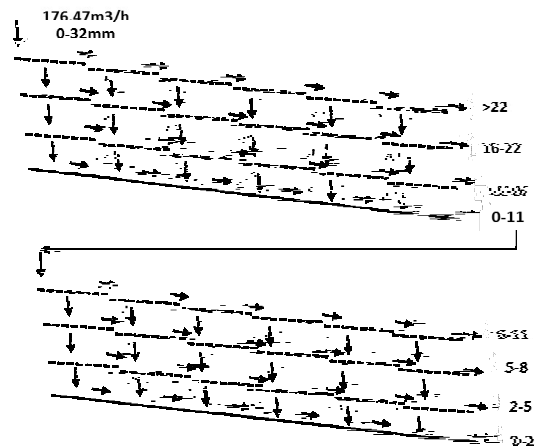
ścią przesiewania, zależnym od względnej wielkości przesiewanych ziaren, który wyznacza się na drodze eksperymentalnej, uwzględniając wszystkie ważniejsze parametry geometryczne i dynamiczne sita (wektor $\mathbf{m}$), takie jak częstotliwość i amplituda drgań, współczynnik światła, długość, szerokość i kąt nachylenia sita, natężenie strumienia nadawcy, prędkość ruchu ziaren na sicie.

3. OPIS I WYNIKI EKSPERYMENTU

Przedmiotem analizy jest zapożyczony z praktyki przykład układu przesiewacza wibracyjnych, trzypokładowych. Do obliczeń przyjęto następujące wartości parametrów: szerokość sita – 1,8 m, długość sita – 6 m, częstotliwość drgań – 18 Hz, kąt nachylenia ruchu sita – 0,36 rad., amplituda drgań – 0,003 mm, współczynnik światła sit 0,4–0,5. Wycinek tego układu wyjęty z większej całości pokazano na rysunku 2, a jego model obliczeniowy – na rysunku 3.

Układ przesiewania zasilany jest produktem kruszenia kruszarki 3-stopnia rozdrabniania o wydajności 176,47 m³/h. Nominalne granice produkowanych frakcji to 22, 16, 11, 8, 5, 2 mm, ale zastosowane wielkości to 22, 18, 12,5, 9, 5,5 i 3 mm.

Do eksperymentów cyfrowych użyto modelu układu sit i ich parametrów technologicznych (wielkość oczek, tab. 1). Każdy pokład sitowy podzielono na 6 równych segmentów o długości 1 m. W ten sposób uzyskano nadsobno-posobny układ 6×6 sit jak na rysunku 3.



Rys. 3. Model obliczeniowy przesiewaczy
Fig. 3. Model of the calculation system

Tab. 1. Schemat układu sit i warianty obliczeń: 0 – oczka nominalne niezmiennie,
1 – zmienne po długości, 2 – powiększone niezmiennie (rzeczywiste)

Tab. 1. Flowsheet of screening and simulated sets of parameters: case 0 – nominal apertures,
case 1 – variable apertures along the deck, case 2 – increased apertures along the deck

Wariant 0		Średnice nominalne oczek zgodne z granicami frakcji					
		numer odcinka/sita pokładu sitowego					
numer	<i>i/j</i>	1	2	3	4	5	6
	1	22	22	22	22	22	22
pokładu	2	16	16	16	16	16	16
	3	11	11	11	11	11	11
sitowego	4	8	8	8	8	8	8
	5	5	5	5	5	5	5
	6	2	2	2	2	2	2

Wariant 1		Średnice ostatnich 2 segmentów powiększone o 1–2 mm					
		numer odcinka/sita pokładu sitowego					
numer	<i>i/j</i>	1	2	3	4	5	6
	1	22	22	22	22	22	22
pokładu	2	16	16	16	16	18	18
	3	11	11	11	11	12	12
sitowego	4	8	8	8	8	10	10
	5	5	5	5	5	6	6
	6	2	2	2	2	3	3

Wariant 2		Średnice nominalne oczek zastosowane w praktyce					
		numer odcinka/sita pokładu sitowego					
numer	<i>i/j</i>	1	2	3	4	5	6
	1	22	22	22	22	22	22
pokładu	2	18	18	18	18	18	18
	3	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
sitowego	4	9	9	9	9	9	9
	5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
	6	3	3	3	3	3	3

Tab. 2. Wyniki obliczeń dla wariantu 0 (nominalne oczka sit)
 Tab. 2. Results of calculation performed for the case of 0 (nominal apertures)

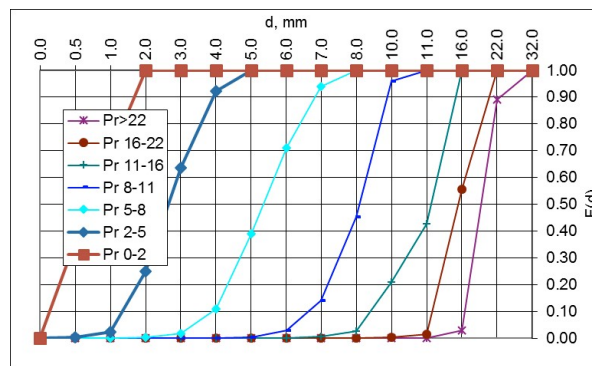
W	$a+b$	χ	Produkt	αQ	βQ	$s(d_2-d_1)$
			0-2	39,06	28,26	0,72
21,39	0,75	0,67	2-5	47,06	32,10	0,68
8,43	0,61	0,36	5-8	34,86	23,36	0,67
2,35	0,55	0,18	8-11	24,50	13,21	0,54
4,03	0,57	0,25	11-16	22,76	15,89	0,70
-1,42	0,44	-0,26	16-22	7,93	5,54	0,70
0,12	0,62	0,39	>22	0,30	0,30	1,00
34,90				176,47	118,66	

Tabela 3. Wyniki obliczeń dla wariantu 1 (zmiennie oczka sit)
 Table 3. Results of calculation in the case of 1 (variable apertures)

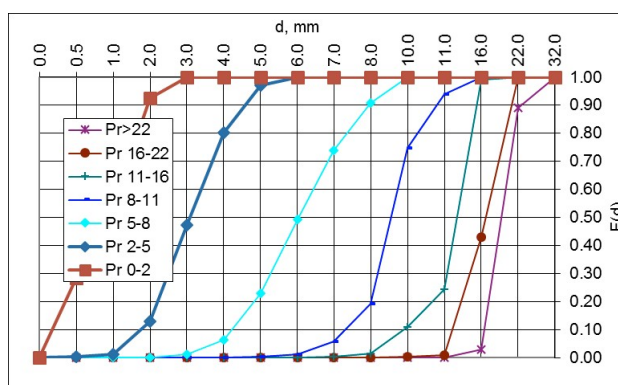
W	$a+b$	χ	Produkt	αQ	βQ	$s(d_2-d_1)$
			0-2	39,06	33,75	0,86
27,91	0,84	0,81	2-5	47,06	34,35	0,73
15,60	0,68	0,53	5-8	34,86	29,54	0,85
9,93	0,75	0,66	8-11	24,50	15,01	0,61
11,61	0,75	0,66	11-16	22,76	17,55	0,77
1,34	0,57	0,25	16-22	7,93	5,34	0,67
0,12	0,62	0,39	>22	0,30	0,30	1,00
66,51				176,47	135,84	

Tabela 4. Wyniki obliczeń dla wariantu 2 (zmiennie oczka sit)
 Table 4. Results of calculation in the case of 2 (increased apertures)

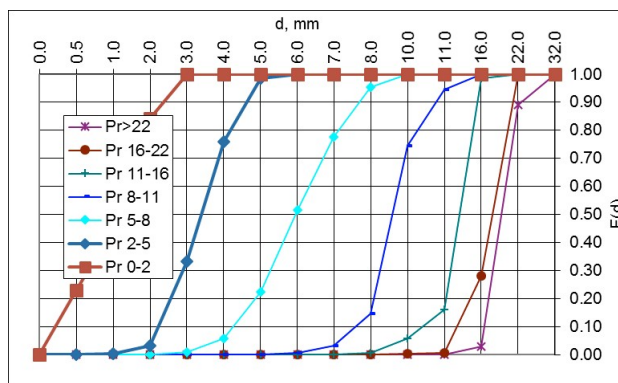
W	$a+b$	χ	Produkt	αQ	βQ	$s(d_2-d_1)$
			0-2	39,06	37,97	0,97
28,92	0,95	0,95	2-5	47,06	30,47	0,65
19,37	0,73	0,63	5-8	34,86	30,75	0,88
14,16	0,80	0,75	8-11	24,50	18,93	0,77
15,31	0,83	0,79	11-16	22,76	19,41	0,85
3,15	0,72	0,61	16-22	7,93	5,18	0,65
0,12	0,62	0,39	>22	0,30	0,30	1,00
81,03				176,47	143,01	



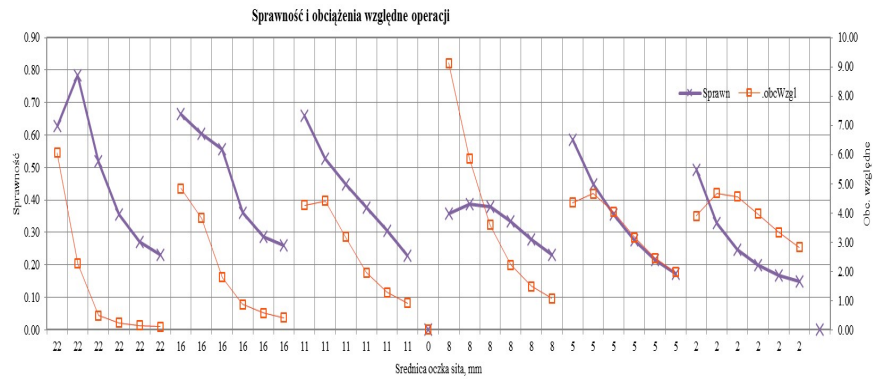
Rys. 4. Skład ziarnowy produktów dla nominalnych wielkości oczek sit; wariant 0
Fig. 4. Product size distribution for the nominal apertures; case of 0



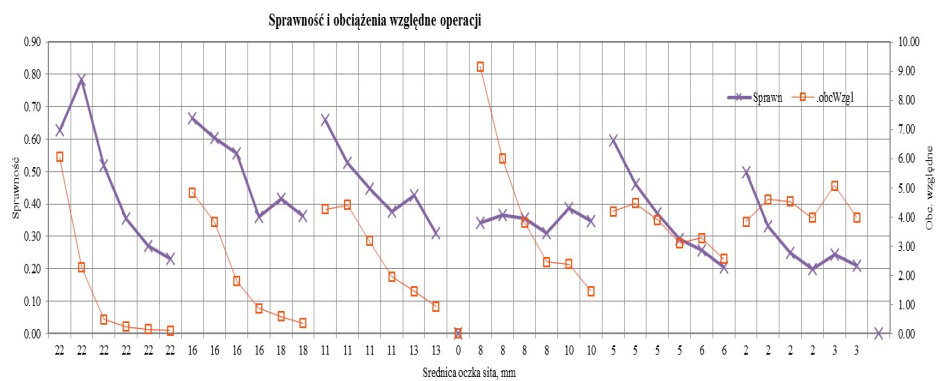
Rys. 5. Skład ziarnowy produktów dla zmiennych wielkości oczek sit; wariant 1
Fig. 5. Product size distribution for the variable apertures; case of 1



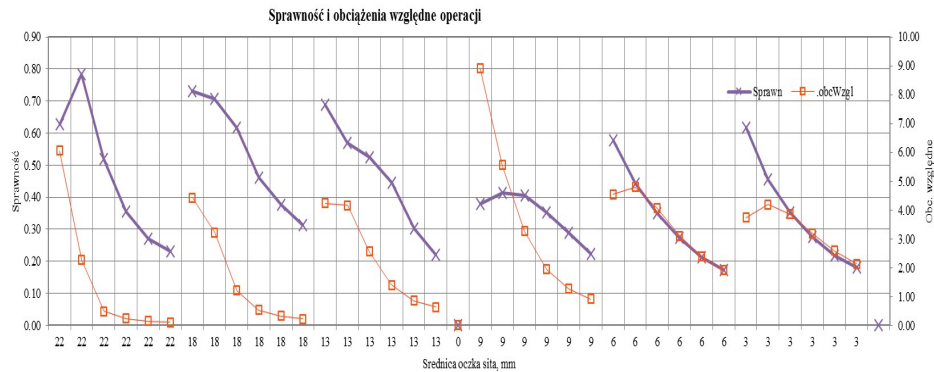
Rys. 6. Skład ziarnowy produktów dla nominalnych wielkości oczek sit; wariant 2
Fig. 6. Product size distribution for the case of 2



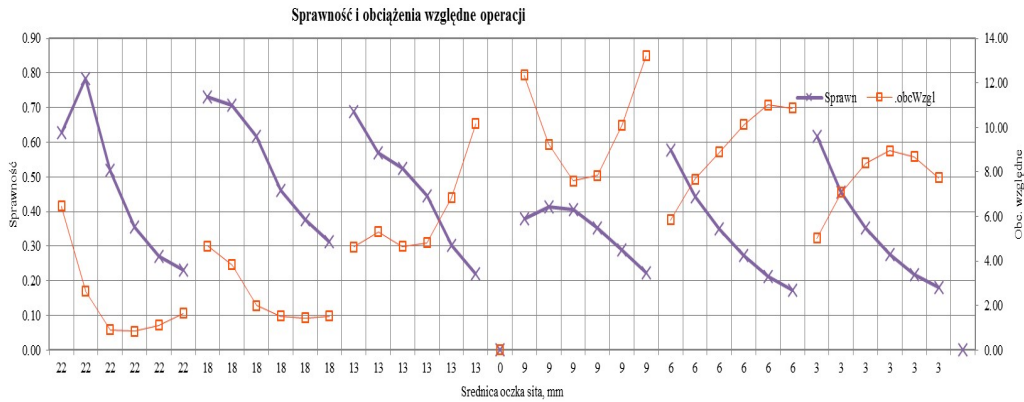
Rys. 7. Sprawność przesiewania i względne obciążenia sit dla wariantu 0 (nominalne oczka, $u_{zt} = 0$)
 Fig. 7. Screening efficiency and relative load of screens for the the case of 0 (nominal apertures, $u_{zt} = 0$)



Rys. 8. Sprawność przesiewania i względne obciążenia sit dla wariantu 1 (oczka zmienne, $u_{zt} = 0$)
 Fig. 8. Screening efficiency and relative load of screens for the case of 1 (variable apertures, $u_{zt} = 0$)



Rys. 9. Sprawność przesiewania i względne obciążenia sit dla wariantu 2 (zwiększone oczka, $u_{zt} = 0$)
 Fig. 9. Screening efficiency and relative load of screens for the case of 2 (increased apertures, $u_{zt} = 0$)



Rys. 10. Sprawność przesiewania i względne obciążenia sit dla wariantu 2 (zwiększone oczka, $uzt > 0$)
 Fig. 10. Screening efficiency and relative load of screens for the case of 2 (increased apertures, $uzt > 0$)

Obliczenia wykonano dla stałego obciążenia pierwszego górnego sita i zadanego składu ziarnowego nadawy. W toku doświadczeń obserwowano sprawność przesiewania i obciążenie względne kolejnych sit, a także jakość produktów handlowych. Obciążenie względne to obciążenie sita nadawą, odniesione do wydajności technicznej sita

$$Q_{wgl} = \frac{\alpha \cdot Q_0}{q \cdot S} \quad (4)$$

gdzie:

- α – udział ziaren klasy podsitowej w nadawie,
- Q_0 – ilość ziaren klasy podsitowej w nadawie, $[m^3/h]$
- S – pole powierzchni sita, $[m^2]$.

W tym przypadku korzystano z tzw. *metody podziarna* – klasycznej metody szacowania wydajności technicznej sita wyrażonej wzorem (Malewski 1988 2015)

$$q = 321 \cdot d_s^{0,785} \cdot (1 - wzt), \quad [m^3] / [m^2] / [h] \quad (5)$$

gdzie:

- d_s – średnica oczka sita, $[m]$,
- wzt – współczynnik ziaren trudnych.

W tym wzorze występuje tzw. współczynnik ziaren trudnych $wzt = 1 - uzt$, gdzie uzt jest udziałem tzw. ziaren trudnych w nadawie w granicach $0,7 \div 1,4 d_s$.

Obliczenia wykonano z pominięciem $wzt = 0$ (rys. 7–9) i uwzględnieniem tego wpływu ($uzt > 0$, rys. 10). To wyjaśnia różnice charakteru zmienności funkcji obciążenia sit na tych rysunkach; są one malejące, gdy $wzt = 0$ i odwrotnie w przeciwnym wypadku.

Obliczono również sprawność wydzielania frakcji nominalnej do określonego produktu finalnego; wartości liczbowe zawiera ostatnia kolumna tabel 2–4. W tym przy-

padku sprawność tę definiuje się ilorazem ilości/wychodu ziaren w przedziale wartości nominalnych i ilość tych ziaren w nadawie pierwszego przesiewacza (w tabelach wartości $\beta Q/\alpha Q$). Tabele 2–4 zawierają także wyniki obliczenia wskaźnika jakości produkcji (Malewski & Baszczyńska 2013), określony jako

$$W = \sum_i C_i \cdot \chi_i \cdot q_i \quad (6)$$

$$\chi = 1 - \frac{a+b}{c}; \quad a+b+c=1 \quad (7)$$

gdzie:

- a – udział podziarna,
- b – udział nadziarna,
- c – udział frakcji nominalnej w produkcie finalnym,
- q_i – wychód/iłość/udział i -produktu, przy przyjęciu cen/wag produktów $C_i = 1$.

4. WNIOSKI

- Obliczenia pokazują ilościowo nierównomierny charakter obciążenia przesiewacza, a także mocno zróżnicowany rozkład sprawności przesiewania i rozkład względnej grubości warstwy nadawy na długości pokładów sitowych; pokazują też, że nawet niewielkie zmiany parametrów przesiewania powodują trudne do przewidzenia reakcje w procesie.
- Sprawność przesiewania spada w miarę przepływu ziaren po sicie, czego należało oczekiwać, ale zmienność wydajności technicznej sit z uwzględnieniem i nieuwzględnieniem ziaren trudnych diametralnie się różnią. Wynik ten pokazuje, że należy z wielką ostrożnością przyjmować wszelkie metody przewidywania wydajności przesiewaczy, bo wynik zależy ściśle od konkretnego składu ziarnowego nadawy i sprawności procesu klasyfikacji, jak i też od samej definicji wydajności sita.

Obserwowane na rysunkach 7–10 wartości skuteczności przesiewania zawierają się w granicach 80–20% z tendencją spadkową w miarę ubywania ziaren drobnych na drodze przesiewania. Efekt sumaryczny dla całego pokładu (dłuższy czas przesiewania) jest wysoki i jakość produktów finalnych dobra, jeśli powiększy się wielkości oczek sit ponad wartości nominalne (tab. 2–4 i rys. 4–6).

- Silna zależność wskaźnika jakości (wzór 6) od wielkości otworów sit (pierwsza kolumna tab. 2–4) wskazuje na przydatność tej miary do optymalizacji procesu przesiewania.
- Eksperymenty symulacyjne przesiewania wg trzech układów wielkości oczek sit pokazały, że najgorszy wynik uzyskuje się przy nominalnych wielkościach oczek;

niedobry dla powiększonych oczek w ostatnich 2 segmentach, a jeszcze lepszy gdy powiększono wszystkie oczka tak, jak to uczyniono w praktyce (tab. 2–4). Uzyskane rezultaty to w kolejności: 34,90, 66,52, 81,93 m³/h frakcji podstawowej w produktach finalnych przesiewania, co w jednostkach względnych (w stosunku do całości nadawy) wyraża się liczbami: 27,6%, 52,6%, 64,8% ilości frakcji podstawowej w produktach finalnych.

LITERATURA

- DRZYMAŁA J., 2007, *Mineral processing*, WUT, Wrocław.
- KRAWIEC H., 1979, *Metoda określania skuteczności przesiewania w wielositowym przesiewniku wibracyjnym* (rozprawa doktorska), Rap. P–69/79, Wrocław, PWt.
- ŁAWIŃSKA K., MODRZEWSKI R., WODZIŃSKI P., 2014, *Wyniki badań kruszyw mineralnych na przesiewaczu dwuczęściowym*, Mining Science, vol. 21(1), 129–138.
- MALEWSKI J., 1981, *Zasady rozdrabniania i klasyfikacji*, Oficyna Wydawnicza PWt.
- MALEWSKI J., 1988, *Efektywność operacji przesiewania*, Górn. Odkr., nr 2/3, 61–69.
- MALEWSKI J., BASZCZYŃSKA M., 2014, *Optymalizacja procesu przesiewania w przesiewaczach wielopokładowych*, Powder & Bulk nr 2.

CONTROL OF THE SCREENING PROCESS IN MULTI-DECK SCREENS

Digital simulation is the effective method to have a knowledge on the screening efficiency of complex multi-deck separation system and reliable tool for optimizing the process. Controlling parameter of the screening process is the screen aperture. The paper presents results of digital experiments performed on two 3-deck screens. The screening efficiency of the process along the surface of three-deck screen device is analyzed in the paper. Each deck of a screen is assumed as the subsequent system of 6 screens of the equal length and different size aperture. Simulation of the process performed gave the answer how the screened material is distributed by the mass and grain size as well as how the screening efficiency is distributed depend on feed load and size distribution or parameters of the screens. The total result of the process was evaluated by process quality indicator. Calculations are based on the mathematical model of screening as a function geometric and dynamic parameters of the screen.

Keywords: *multi-deck screens, simulation, performance, optimization*