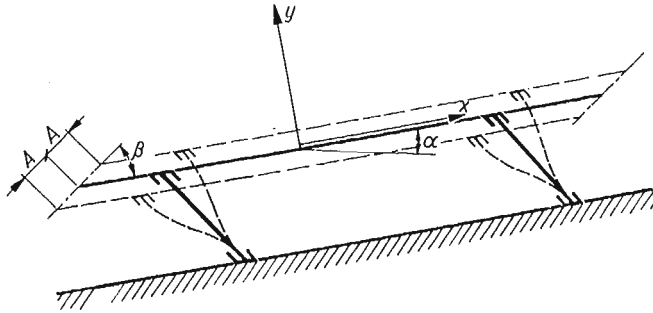


DOBÓR PARAMETRÓW RUCHU PRZENOŚNIKÓW WIBRACYJNYCH

ANTONI CZUBAK (KRAKÓW)

1. Wstęp

Prędkość przemieszczania nosiwa wzdłuż rynny przenośnika wibracyjnego, a więc i wydajność transportowania, zależy od własności fizycznych nosiwa — takich, jak ciężar nasypowy, stopień rozdrobnienia i współczynnik tarcia, oraz od parametrów związanych z konstrukcją maszyny i jej ustawieniem. Parametrami tymi są: częstotliwość drgań rynny f , amplituda A , kąt β między torem dowolnego punktu rynny i jej powierzchnią (rys. 1) oraz kąt α nachylenia



Rys. 1

powierzchni rynny względem poziomu. Konstruktor projektujący przenośnik wibracyjny musi się liczyć z właściwościami fizycznymi nosiwa, chociaż nie ma na nie żadnego wpływu i nie może ich kształtować. Może natomiast dobrać swobodnie parametry drgań rynny. Zagadnienie sprowadza się do określenia chwili oderwania nosiwa od powierzchni rynny, długości lotu i chwili upadku z powrotem na rynnę. Jest to zależne od współczynnika podrzutu K , który jest stosunkiem normalnej składowej przyspieszenia rynny względem jej powierzchni i normalnej składowej przyspieszenia ziemskiego:

$$K = \frac{4\pi^2 f^2 A \sin \beta}{g \cos \alpha}, \quad (1.1)$$

gdzie g oznacza przyspieszenie ziemskie. K musi być większe od jedności, ażeby nosiwo mogło choć na chwilę oderwać się od rynny, ponadto im K jest większe, tym lot nosiwa jest dłuższy [1-5].

2. Analiza dotychczasowych zaleceń doboru stosunku K

W przesiewaczach [6-9] nosiwo powinno spadać na sito wibracyjne w tym samym okresie ruchu sita, w którym rozpoczęło lot. Jeśli literą m oznaczymy stosunek czasu lotu nosiwa do okresu drgań sita lub rynny, to powyższy warunek będzie spełniony, gdy $0 < m \leq 1$, wtedy $1 < K \leq 3,3$. Pogląd ten jest słuszny, jeśli chodzi o przesiewacze, gdyż tam głównym celem jest przesianie nadawy, zatem liczba zetknięć nosiwa z powierzchnią sita powinna być możliwie największa.

Żuczkow [10] zaleca, żeby czas odpowiadający upadkowi nosiwa na rynnę wynosił $3/4$ okresu drgań rynny przenośnika i wszystkie swoje rozważania oraz obliczenia opiera na tym warunku. Wtedy $K \approx 1,68$.

WEHMEIER [3] zestawił tablicę wartości K , które poleca i przy których można stosować jego wzór na średnią prędkość transportowania [3, 4].

Jeżeli współczynnik podrzutu K mieści się w granicach podanych w tablicy 1, wtedy cykl ruchu nosiwa składa się z czterech faz. W czasie pierwszej fazy

Tablica 1

K	1,00 do 3,30	4,60 do 6,36	7,79 do 9,48	10,94 do 12,61
m	0,00 do 1,00	1,40 do 2,00	2,45 do 3,00	3,466 do 4,00

nosiwo przemieszcza się razem z rynną nie wykonując względem niej żadnych ruchów, w drugiej fazie występuje poślizg nosiwa względem rynny, w trzeciej oderwanie od powierzchni rynny i swobodny lot w powietrzu, w czwartej upadek i wyrównanie prędkości nosiwa i rynny. Gdyby natomiast współczynnik podrzutu K nie mieścił się w podanych granicach, wtedy nosiwo spadając miałyby tendencję do ponownego oderwania od rynny, jednak z prędkością mniejszą od prędkości, z jaką odrywa się od rynny po przejściu pierwszej i drugiej fazy ruchu [1, 3]. W ten sposób następowałyby po sobie długie i krótkie skoki nosiwa. Byłoby to niekorzystne, gdyż krótki skok wybitnie zmniejsza prędkość transportowania i ruch nosiwa jest przy tym nierównomierny. Słuszność swojej tezy dowiódł WEHMEIER doświadczalnie, poza tym potwierdziły ją także doświadczenia SIERGIEJEW [3, 11].

BLECHMAN [12] zaleca stosować K w granicach

$$\sqrt{\pi^2 p^2 + 1} \leq K \leq \sqrt{\pi^2 p^2 + 4}$$

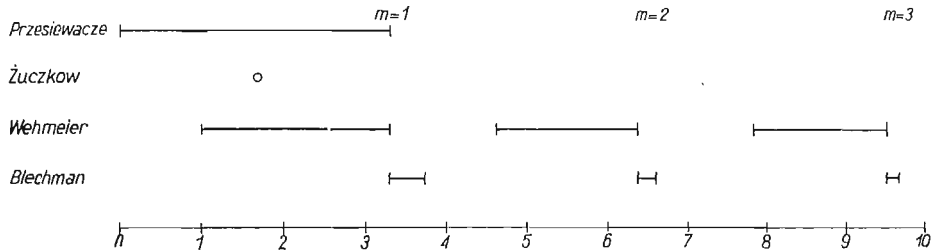
i podaje, że K powinno być średnią wartością obu granic:

$$K = \frac{1}{2} (\sqrt{\pi^2 p^2 + 1} + \sqrt{\pi^2 p^2 + 4}).$$

We wzorach powyższych p jest liczbą naturalną. Dla $p = 1, 2$ i 3 mamy odpowiednio $K = 3,51; 6,48$ i $9,55$.

Łatwo się zorientować, że powyższe wartości K mieszczą się poza granicami przedziałów zalecanymi przez WEHMEIERA. Najlepiej zilustruje to rys. 2.

Okazuje się, że zalecenia odnośnie doboru współczynnika podrzutu K są bardzo rozbieżne. Warto więc zanalizować proces ruchu nosiwa na rynnie przenośnika wibracyjnego i podjąć próbę określenia takich warunków jego pracy, ażeby osiągnąć optymalny efekt transportowania.



Rys. 2

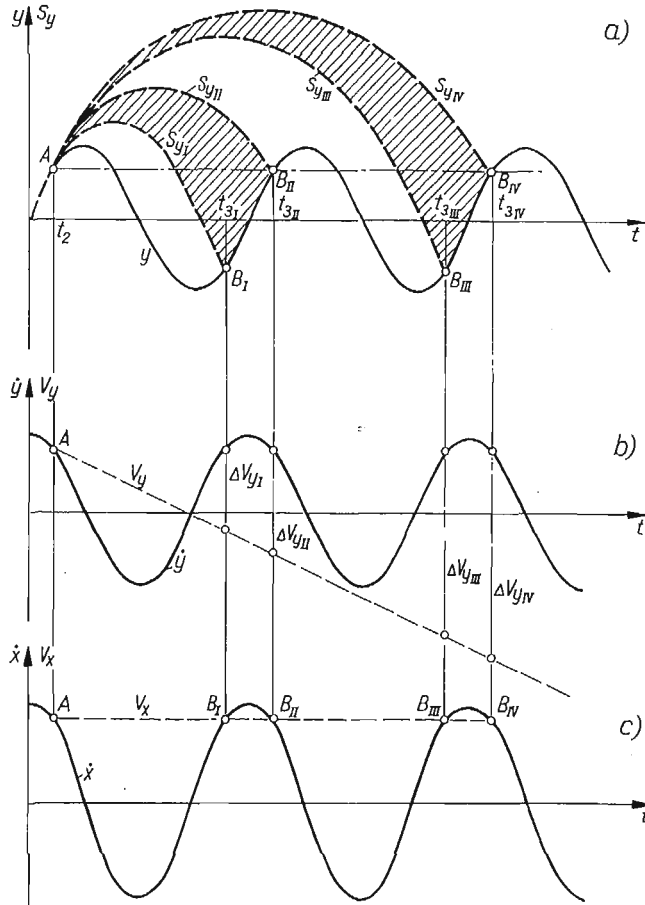
3. Zasada najkorzystniejszego ruchu przenośnika

Z pewnym przybliżeniem można przyjąć, że rynna wykonuje ruch harmoniczny. Na rys. 3 liniami ciągłymi wykreślono: przemieszczenie normalne y (rys. 3a), prędkość normalną rynny \dot{y} (rys. 3b) i prędkość styczną rynny \dot{x} (rys. 3c) jako funkcje czasu t . Przypuśćmy, że nosiwo zostało podrzucone w chwili t_2 w punktach oznaczonych na wykresach literą A . Jeśli pominąć fazę poślizgu, jak to się czyni przy tego rodzaju rozważaniach [2-5], to można przyjąć, że w chwili oderwania się nosiwo ma taką samą prędkość jak rynna. Jeżeli rynna jest pozioma i jeśli pominąć opory powietrza, to w czasie lotu w kierunku stycznym do powierzchni rynny na nosiwo nie działa żadna siła, a więc jego prędkość v_x jest stała (linia przerywana na rys. 3c), natomiast w kierunku normalnym działa tylko siła ciężkości, a więc prędkość nosiwa v_y jest liniową funkcją czasu (linia przerywana na rys. 3b)¹. Funkcja normalnego przemieszczenia nosiwa s_y jest w takich warunkach parabolą drugiego stopnia (linia przerywana na rys. 3a). Biorąc pod uwagę wykresy na rys. 3a oraz 3b łatwo zauważyć, że jeśli nosiwo upadnie w punktach B_I , B_{II} , B_{III} i B_{IV} , to jego prędkość styczna będzie równa w chwili upadku prędkości stycznej rynny. Jeśli nosiwo upadnie między punktami B_I i B_{II} oraz B_{III} i B_{IV} , to prędkość styczna rynny będzie większa od prędkości nosiwa, natomiast przy upadku w każdym innym miejscu mniejsza.

Styczny kierunek ruchu jest jednocześnie kierunkiem transportowania, a więc kiedy prędkość styczna rynny w chwili upadku jest większa od prędkości stycznej nosiwa, to nosiwo przy zetknięciu z rynną jest jak gdyby przez nią popędzane i ruch nosiwa staje się bardziej płynny. Kiedy natomiast przy upadku prędkość styczna rynny jest mniejsza od prędkości stycznej nosiwa lub ma wartość ujemną, wówczas nosiwo po upadku zostaje przyhamowane, co niewątpliwie odbija się na średniej prędkości transportowania. Z rysunku 3b

¹ Ze względu na przejrzystość rys. 3 nie jest ściśły; w rzeczywistości każdemu przypadkowi ruchu powinny odpowiadać różne wykresy y , \dot{y} , \dot{x} , v_y , v_x .

wynika, że w strefach między punktami B_I i B_{II} oraz B_{III} i B_{IV} różnice między normalnymi prędkościami nosiwa i rynny są dość pokaźne, a zatem podczas upadku nastąpi silne uderzenie w kierunku normalnym nosiwa o rynnę i silny docisk nosiwa do rynny, co zapewni nadanie nosiwu prędkości stycznej.



Rys. 3

Z przytoczonej analizy ruchu wynika, że przenośnik wibracyjny będzie pracował najkorzystniej wówczas, gdy przy upadku nosiwa na rynnę prędkość styczna rynny będzie większa od prędkości stycznej nosiwa lub co najmniej jej równa. Oczywiście należy uwzględnić ograniczenie współczynnika podrzutu K wysunięte przez WEHMEIERA.

4. Matematyczne ujęcie przyjętej zasady

Zgodnie z rys. 1 i 3 normalne oraz styczne przemieszczenia rynny opisują następujące funkcje czasu t :

$$(4.1) \quad y = A \sin \beta \sin 2\pi ft,$$

$$(4.2) \quad x = A \cos \beta \sin 2\pi ft.$$

Po zróżniczkowaniu podług czasu otrzymuje się normalną i styczną prędkość rynny

$$(4.3) \quad \dot{y} = 2\pi f A \sin \beta \cos 2\pi ft,$$

$$(4.4) \quad \dot{x} = 2\pi f A \cos \beta \cos 2\pi ft,$$

a po dwukrotnym zróżniczkowaniu przyspieszenie normalne

$$(4.5) \quad \ddot{y} = -4\pi^2 f^2 A \sin \beta \sin 2\pi ft.$$

Przy pominięciu oporu powietrza w czasie lotu na nosiwo działa tylko siła ciężkości, a więc w kierunku normalnym i stycznym składowe przyspieszenia wynoszą

$$(4.6) \quad a_y = -g \cos \alpha,$$

$$(4.7) \quad a_x = -g \sin \alpha.$$

Po dwukrotnym scałkowaniu wyrażenia (4.6) i obliczeniu stałych całkowania z warunku, że w chwili początkowej t_2 prędkość normalna nosiwa wynosi $v_y = \dot{y}(t_2)$, zaś jego położenie $s_y = y(t_2)$, otrzymamy funkcję przemieszczenia nosiwa w kierunku normalnym do powierzchni rynny:

$$(4.8) \quad s_y = -\frac{g \cos \alpha}{2} (t^2 - t_2^2) + g t_2 \cos \alpha (t - t_2) + 2\pi f A \sin \beta \times \\ \times \cos (2\pi f t_2)(t - t_2) + A \sin \beta \sin 2\pi f t_2.$$

Z kolei całkując wyrażenie (4.7) i obliczając stałą całkowania z warunku, że w chwili t_2 prędkość styczna nosiwa wynosi $v_x = \dot{x}(t_2)$, otrzymujemy prędkość styczną nosiwa:

$$(4.9) \quad v_x = -g(t - t_2) \sin \alpha + 2\pi f A \cos \beta \cos 2\pi f t_2.$$

Po okresie lotu nosiwo spada na powierzchnię rynny w czasie t_3 . W tej chwili przemieszczenia normalne rynny i nosiwa są równe:

$$(4.10) \quad s_y(t_3) = y(t_3).$$

Po podstawieniu do równania (4.10) funkcji (4.8) i (4.1), mamy

$$(4.11) \quad -\frac{g \cos \alpha}{2} (t_3^2 - t_2^2) + g t_2 \cos \alpha (t_3 - t_2) + 2\pi f A \sin \beta \cos (2\pi f t_2) \times \\ \times (t_3 - t_2) + A \sin \beta \sin 2\pi f t_2 = A \sin \beta \sin 2\pi f t_3.$$

W chwili upadku prędkość styczna rynny powinna być nie mniejsza od prędkości stycznej nosiwa

$$(4.12) \quad v_x(t_3) \leq \dot{x}(t_3).$$

Podstawiając tu funkcje (4.9) i (4.4) otrzymamy

$$(4.13) \quad -(t_3 - t_2) g \sin \alpha + 2\pi f A \cos \beta \cos 2\pi f t_2 \leq 2\pi f A \cos \beta \cos 2\pi f t_3.$$

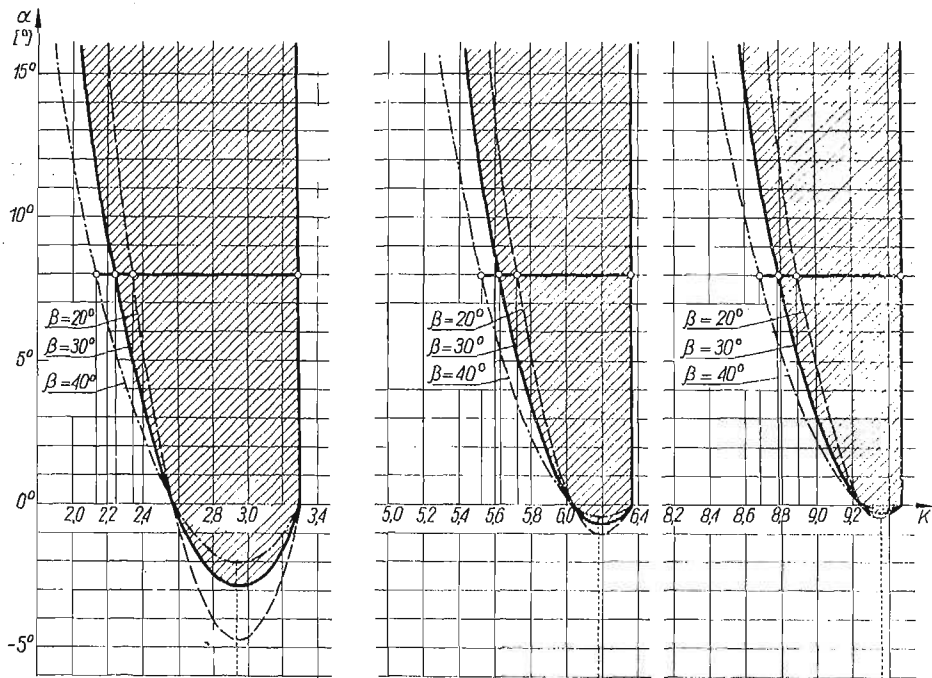
Równanie (4.11) i nierówność (4.13) stanowią układ opisujący zasadę najkorzystniejszego ruchu przenośnika wibracyjnego. Do równań tych należy podstawić wartości czasów t_2 i t_3 .

Czas t_2 można wyliczyć z warunku, że w chwili odrywania docisk nosiwa do powierzchni rynny maleje do zera. Po odpowiednich przekształceniach otrzymujemy:

$$(4.14) \quad \sin 2\pi f t_2 = \frac{1}{K}.$$

Wiadomo także, że m jest stosunkiem czasu lotu nosiwa do okresu drgań rynny:

$$(4.15) \quad m = \frac{t_3 - t_2}{T} = f(t_3 - t_2).$$



Rys. 4

Wprowadzając wyrażenia (4.14) i (4.15) do równania (4.11) otrzymujemy:

$$(4.16) \quad \sqrt{K^2 - 1} = \frac{\cos 2\pi m - 2\pi^2 m^2 - 1}{2\pi m - \sin 2\pi m}.$$

Natomiast po podstawieniu tych wyrażeń do nierówności (4.13) mamy

$$(4.17) \quad -2\pi m \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \leq \sqrt{K^2 - 1} (\cos 2\pi m - 1) - \sin 2\pi m.$$

Dla konkretnych wartości kątów α i β układ (4.16) i (4.17) ma dwie niewiadome K i m . Rozwikłanie jednak układu ze względu na K jest niemożliwe, gdyż zarówno równanie (4.16) jak i nierówność (4.17) są przestępne. Pozostają

więc metody przybliżone, np. metoda iteracji lub metoda graficzna. Stosując tę ostatnią rozwiązano powyższy układ dla szeregu wartości kątów α i β . Na podstawie przeprowadzonych obliczeń skonstruowano nomogram (rys. 4), z którego można dobierać współczynnik podrzutu K w ten sposób, żeby była spełniona zasada najkorzystniejszego ruchu przenośnika wibracyjnego.

5. Nomogram doboru stosunku K

Jeżeli np. rynna przenośnika jest nachylona pod kątem $\alpha = 8^\circ$ (transportowanie odbywa się z dołu pod górę), to można odczytać z nomogramu, że zasada najkorzystniejszego ruchu jest spełniona, gdy:

$$\begin{aligned} K &= 2,13 \text{ do } 3,3, & 5,51 \text{ do } 6,36, & 8,67 \text{ do } 9,48 & \text{ przy } \beta = 40^\circ, \\ K &= 2,24 \text{ do } 3,3, & 5,62 \text{ do } 6,36, & 8,78 \text{ do } 9,48 & \text{ przy } \beta = 30^\circ, \\ K &= 2,34 \text{ do } 3,3, & 5,72 \text{ do } 6,36, & 8,9 \text{ do } 9,48 & \text{ przy } \beta = 20^\circ. \end{aligned}$$

Istnieje więc kilka obszarów, w których przyjęta zasada jest spełniona. Pierwszy obszar odpowiada $m \leq 1$, czyli przypadkowi kiedy czas lotu jest krótszy od okresu drgań rynny. Drugi obszar odpowiada $1 < m \leq 2$, trzeci $2 < m \leq 3$ itd. Nomogram na rys. 4 obejmuje tylko trzy pierwsze obszary. Każdy obszar przy kątach $\alpha > 0$ jest ograniczony z lewej strony krzywą, której współrzędne spełniają układ (4.16) i (4.17), z prawej zaś prostą pionową wynikającą z ograniczeń WEHMEIERA.

Przy kątach $\alpha < 0$ obszary ograniczone są z obu stron krzywymi wynikającymi z zasady najkorzystniejszego ruchu przenośnika. Przy transportowaniu w dół pod dość dużymi kątami ($\alpha < 0$) zasada większości prędkości stycznej rynny od prędkości stycznej nosiwa nie może być spełniona; wtedy należy dobierać stosunek K w ten sposób, żeby chociaż różnice między tymi prędkościami były najmniejsze, a więc $K \approx 2,94, 6,19, 9,36$ itd. (Na rysunku 4 proste pionowe kropkowane).

Chociaż zasada najkorzystniejszego ruchu przenośnika jest spełniona w całym zakresowanym obszarze (np. dla $\beta = 30^\circ$), to lepiej stosować wartości K odpowiadające lewej gałęzi krzywej. Przy wartościach K stanowiących górną granicę przedziałów WEHMEIERA nosiwo opada na rynnę w takiej fazie ruchu, że ma od razu tendencję do ponownego oderwania się od rynny. Ponieważ jednak musi upłynąć pewien okres czasu, zanim opadną wszystkie ziarna warstwy nosiwa, który to okres powinien się zmieścić między chwilą upadku pierwszych ziarn i chwilą ponownego oderwania się warstwy, więc lepiej jeśli upadek nastąpi wcześniej. W ten sposób nosiwo będzie mogło otrzymać od rynny odpowiednio silny impuls w kierunku stycznym.

Po określeniu i wyborze odpowiedniego stosunku K można na podstawie wzoru (1.1) obliczyć częstotliwość drgań rynny f oraz amplitudę A . Przy określonym K średnia prędkość nosiwa zależy od wielkości amplitudy. Jeżeli np. amplitudę A powiększyć x razy, to żeby K pozostało niezmienione, należy zmniejszyć częstotliwość drgań $1/\sqrt{x}$ razy. W rezultacie średnia prędkość nosiwa

zwiększy się \sqrt{x} razy. Zatem im większa jest amplituda przy stałym K , tym większa średnia prędkość transportowania. Nie można jednak powiększać zbytnio amplitudy, bo wraz z jej wzrostem rośnie różnica prędkości Δv , a więc energia uderzenia. Prócz tego trzeba pamiętać o zjawisku opisanym przez BÖTTCHERA [2] i WEHMEIERA [3]. Okazuje się, że dla każdego rodzaju nosiwa przy odpowiedniej grubości warstwy istnieją wartości amplitudy i częstotliwości, przy których ruch nosiwa wzdłuż rynny ustaje.

6. Wybór kątów β i α

Wybór kąta β między styczną do toru rynny i powierzchnią rynny może także nastęrczać pewnych trudności.

Żuczkw [10] wychodząc ze swojej tezy, że $t_3 = 3/4T$, wprowadza warunek zapobiegający poślizgowi nosiwa względem rynny przy upadku i z układu dwóch równań wylicza kąt β oraz amplitudę drgań A lub kąt β i częstotliwość drgań f .

SEIDEL [13] przedstawił specjalny diagram, z którego można dobierać amplitudę, częstotliwość i kąt β .

BLECHMAN [12] podszedł do zagadnienia wyboru kąta β rozważając korzyści, jakie daje zmniejszenie kąta β , a przez to powiększenie prędkości stycznej rynny i związanej z tym prędkości transportowania oraz trudności, które powstaną przy tym na skutek konieczności zwiększenia amplitudy przyspieszeń $4\pi^2 f^2 A$ (żeby utrzymać niezmienną K), co pociąga za sobą wzrost sił bezwładności występujących w maszynie. Na podstawie analizy matematycznej zagadnienia wyliczył, że optymalny kąt nachylenia drgań mieści się w granicach: $24^\circ 30' < \beta_{opt} < 35^\circ 20'$. Pokrywa się to z praktyką, gdyż przeważnie stosuje się kąt $\beta = 30^\circ$. A zatem zalecenia BLECHMANA odnośnie do kąta β powinny stanowić podstawę przy projektowaniu przenośników wibracyjnych.

Kąt nachylenia rynny α powinien być dobrany w zależności od różnicy poziomów i odległości transportowania. Doświadczenia wykazują, że można stosować kąty nachylenia rynny w granicach $-15^\circ < \alpha < 15^\circ$.

W przenośnikach wibracyjnych śrubowych pracujących zawsze przy dodatnich kątach α najlepiej przyjmować $\alpha = 6^\circ$ do 8° .

Literatura cytowana w tekście

- [1] A. CZUBAK, *Przenośniki wibracyjne*, Wydawnictwo «Śląsk», Katowice 1964.
- [2] S. BÖTTCHER, *Beitrag zur Klärung der Gutbewegung auf Schwinggrinnen*, Fördern und Heben, Nr. 3, 4, 5, 1958.
- [3] K. H. WEHMEIER, *Untersuchungen zum Fördervorgang auf Schwinggrinnen*, Fördern und Heben, Nr. 5, 6, 1961.
- [4] A. CZUBAK, *Perspektywy rozwoju badań nad ruchem materiałów sypkich transportowanych przenośnikami wibracyjnymi*, Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Elektryfikacja i Mechanizacja Górnictwa i Hutnictwa, Nr 13, w druku.

- [5] A. CZUBAK, *Motion of a granular material on the screw vibratory conveyor and the calculation of efficiency*, Materiały z konferencji «Dynamika stroju», Praga 1963, w druku.
- [6] Л.Б. ЛЕВЕНСОН, *Машины для обогащения*, Москва — Ленинград 1933.
- [7] И.Р. МАЛКИН, *Об инерционных грохотах*, Записки Ленинградского Горного Института, 3, **10** (1937).
- [8] В.А. ОЛЕВСКИЙ, *Кинематика грохотов*, Ленинград 1941.
- [9] J. DĘGTYŚ, *Teoria i budowa drzesiewaczu*, WGH, Katowice 1955.
- [10] А.П. ЖУЧКОВ, *К определению оптимальных параметров вибротранспортирования* Труды Новочеркавского Политехнического Института, **108** (1960).
- [11] П.А. СЕРГЕЕВ, *Исследование поведения насыпных материалов при вибрационной транспортировке*, Известия Академии Наук СССР ОТН, Мех и Маш., 5, 1960.
- [12] И.И. БЛЕХМАН, *О выборе основных параметров вибрационных конвейеров*, Обогащение руд, 2, 1959.
- [13] H. SEIDEL *Die Wurfbewegung von Schüttgut auf der schwingenden Ebene*. Bergbautechnik, Nr. 8, 9, 1958.

Резюме

ПОДБОР ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Формулируется принцип самого выгодного движения конвейера и дается построенную согласно ему номограмму, служащую для подбора коэффициента подбрасывания K . Этот коэффициент решает о длине полета транспортируемой среды во время подбрасывания. Приводятся также области применимости углов: между касательной к траектории желоба и поверхностью желоба а также между поверхностью и линией горизонта.

Summary

SELECTION OF THE MOTION PARAMETERS FOR VIBRATORY CONVEYORS

The paper contains the formulation of the principle of the most advantageous motion of the conveyor; on this basis a nomograph for the selection of the toss coefficient K is given. The coefficient is crucial for the flight length of the material tossed. There are also given the applicability ranges of the following angles: between the runner track tangent and its surface and between the surface of the runner and the horizontal plane.

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA W KRAKOWIE

Praca została złożona w Redakcji dnia 20 stycznia 1964.