

Wacław Romaniuk<sup>1)</sup>, Piotr Savinych<sup>2)</sup>, Nikolay Turubanov<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach  
Oddział w Warszawie

<sup>2)</sup> Instytut Naukowo-Badawczy Północno-Wschodniej Rosji  
im. N.W. Rudnickiego w Kirowie

## TEORETYCZNE I DOŚWIADCZALNE BADANIA RUCHU CZĄSTEK MATERIAŁU NA ŁOPATKACH WENTYLATORA W ROZDRABNIACZU DZ-4P

### Streszczenie

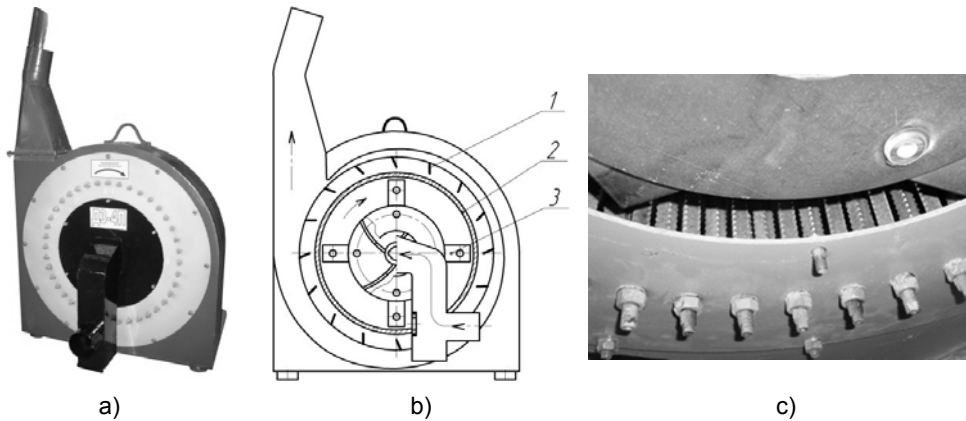
Przedstawiono wyniki teoretycznych i doświadczalnych badań pracy rozdrabniacza bijakowego wyposażonego w wentylator do zadawania i rozładunku paszy. Badano wentylatory wyposażone w łopatki o różnym kształcie i ustawieniu (proste ustawione promieniście i odchylone do tyłu oraz krzywoliniowe odchylone do przodu). Przedstawiono równania do wyznaczania miejsc kontaktu łopatek wentylatora z rozdrobnionymi cząstkami. Miejsca te podlegają zużyciu. Wykazano zgodność obliczeń teoretycznych i badań dotyczących miejsc zużycia łopatek o różnych kształtach i odchyleniu od promienia koła.

**Słowa kluczowe:** rozdrabniacz bijakowy, wentylator, łopatki, zużycie łopatek

### Wstęp

W Instytucie Naukowo-Badawczym Północnego-Wschodu Rosji im. N.W. Rudnickiego, we współpracy z oddziałem warszawskim Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego, opracowano rozdrabniacz bijakowy z sitami, model DZ-4P (rys. 1), z transporterem pneumatycznym. Zastosowanie wentylatora w konstrukcji rozdrabniacza zmniejsza zużycie energii na rozdrabnianie, eliminuje urządzenia załadowczo-wyładowcze i daje wiele innych korzyści. Jednak rozdrabniany materiał, przechodząc przez kanały międzyłopatkowe wentylatora, powoduje zmiany jego wskaźników energetycznych i aerodynamicznych, a także intensywne zużycie jego łopatek, w wyniku czego zmniejsza się niezawodność jego eksploatacji i okres pracy.

Celem eksperymentu było wyznaczenie miejsc kontaktu cząstek rozdrabnianego materiału z łopatkami wirnika wentylatora rozdrabniacza bijakowego.



Źródło: własne. Source: own.

Rys. 1. Rozdrabniacz bijakowy DZ-4P: a) widok ogólny; b) schemat: 1 – łopátka wentylatora, 2 – sito, 3 – wirnik (rotor) bijakowy; c) widok ogólny sita  
 Fig. 1. DZ-4P hammer mill: a) general view; b) scheme: 1 – fan blades, 2 – screen, 3 – hammer mill rotor; c) general view of sieve

## Metody badań

Badano transport cząstek rozdrobnionego materiału za pomocą wentylatorów o różnych kształtach i ustawieniu łopatek: krzywoliniowych odchylnych do przodu o  $20^\circ$  oraz prostych ustawionych promieniście i odchylnych do tyłu pod kątem  $20^\circ$ .

Rozpatrzono ruch cząstek na łopátce (rys. 2a) i zapisano siły działające na cząstkę w układzie osi X i Y:

$$\begin{cases} m \frac{dv_r}{dt} = \omega^2 \cdot x \cdot m - F_{mp}; \\ 0 = \omega^2 \cdot h \cdot m + N - 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \dot{x} \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

$m$  – masa cząstki stałej [kg],

$\frac{dv_r}{dt} = \ddot{x}$  – przyspieszenie ruchu cząstki na łopátce względem układu współrzędnych [ $m \cdot s^{-1}$ ],

$\omega$  – prędkość kątowa łopátki [ $s^{-1}$ ],

$x$  – chwilowa odległość cząstki od osi wirnika (osadzenia łopátki),

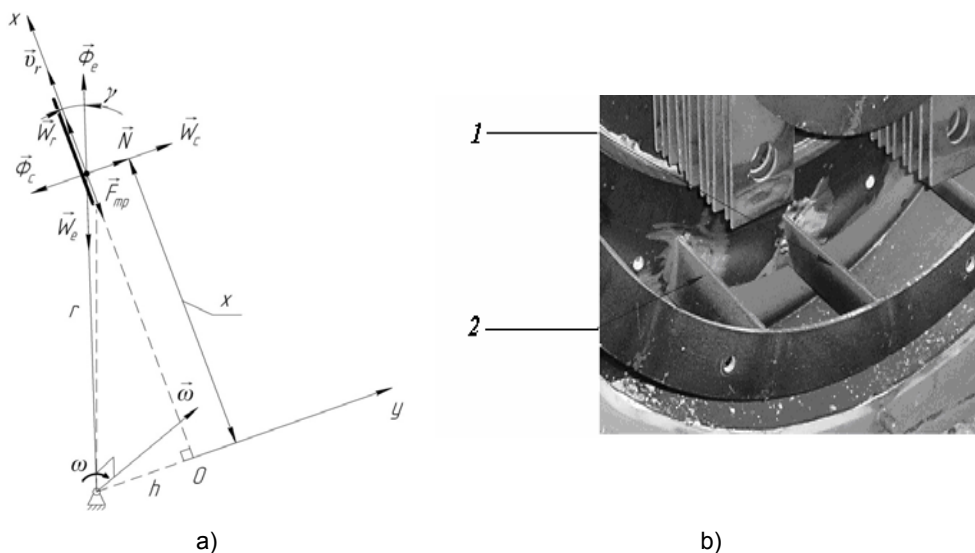
$N$  – siła, z jaką cząstka działa na łopátkę, prostopadła do jej powierzchni [N],

$F_{mp} = |N| \cdot f$  – siła tarcia [N],

$f$  – współczynnik tarcia,

$h$  – długość łopátki [m],

- $\dot{x}$  – prędkość przemieszczania się cząstki na łopatkę względem osi  $x$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  
 $t$  – czas [s].



Źródło: własne. Source: own.

Rys. 2. Kontakt cząstki materiału z łopatką wentylatora rozdrabniacza bijakowego: a) schemat sił działających na cząstkę, b) widok strefy rzeczywistego zużycia łopatki; łopátka prosta: 1 – odchylona do tyłu o  $20^\circ$ , 2 – ustawiona promieniście

Fig. 2. Contact of material particle with fan's blade in a hammer mill: a) scheme of forces affecting the particle, b) picture showing a zone of actual blade wearing; straight blade: 1 – inclined back at  $20^\circ$ , 2 – set radially

Uzyskano:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = \omega^2 \cdot x \cdot m - N \cdot f; \\ 0 = \omega^2 \cdot h \cdot m + N - 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \dot{x} \end{cases} \quad (2)$$

Równanie (2) rozwiązano dla  $\frac{N}{m} \geq 0$ , co jest warunkiem odrywania się cząstki od łopatki wentylatora.

Przekształcając równanie (2), otrzymano różniczkowe równanie ruchu:

$$\ddot{x} + 2 \cdot \omega \cdot \dot{x} \cdot f - \omega^2 \cdot x = \omega^2 \cdot h \cdot f, \quad (3)$$

które można przekształcić do postaci:

$$\ddot{x} + 2 \cdot n \cdot \dot{x} - c \cdot x = a, \quad (4)$$

gdzie:  $n = \omega \cdot f$ ;  $c = \omega^2$ ;  $a = \omega^2 \cdot h \cdot f$ .

Znaleziono rozwiązanie liniowego niejednorodnego różniczkowego równania (4):

– charakterystyka równania:

$$z^2 + 2 \cdot n \cdot z - c = 0. \quad (5)$$

– jego podstawa:  $z_{1;2} = -n \pm \sqrt{n^2 + c}$ .

Ogólne rozwiązanie różniczkowe równania (4) przyjmuje postać:

$$x = e^{-n \cdot t} \cdot \left( C_1 \cdot e^{\sqrt{n^2 + c} \cdot t} + C_2 \cdot e^{-\sqrt{n^2 + c} \cdot t} \right) - \frac{a}{c} \quad (6)$$

W celu określenia stałych  $C_1$  i  $C_2$  różniczkowano równanie (6):

$$\dot{x} = e^{-nt} \cdot \left[ (-n + \sqrt{n^2 + c}) \cdot C_1 \cdot e^{\sqrt{n^2 + c} \cdot t} - (n + \sqrt{n^2 + c}) \cdot C_2 \cdot e^{-\sqrt{n^2 + c} \cdot t} \right] \quad (7)$$

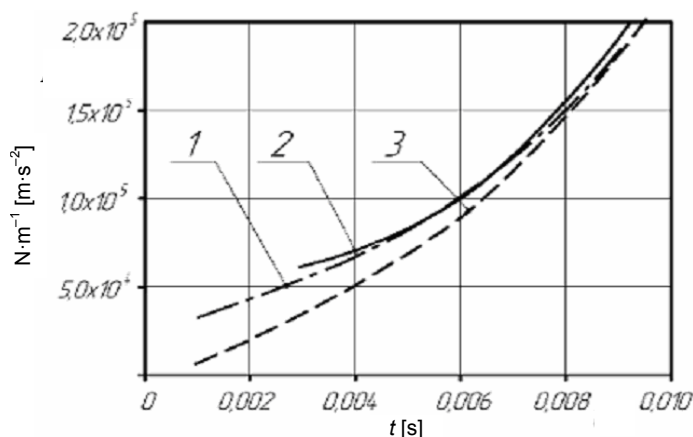
i wykorzystano warunki początkowe ( $t = 0$ ) i brzegowe ( $x = 0$ ,  $\dot{x} = 0$ ).

Z równań (6) i (7) znaleziono:

$$C_1 = \frac{v + a}{2 \cdot c \sqrt{n^2 + c}} \cdot (n + \sqrt{n^2 + c}),$$

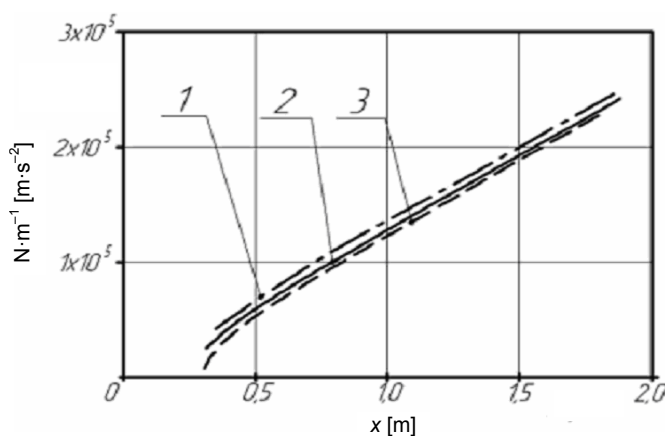
$$C_2 = \frac{-v + a}{2 \cdot c \sqrt{n^2 + c}} \cdot (-n + \sqrt{n^2 + c}).$$

W celu uproszczenia obliczeń krzywoliniową łopatkę, odchyloną o  $20^\circ$  do przodu, zamieniono na prostoliniową odchyloną do przodu o  $20^\circ$  (ponieważ styczna do łopatki krzywoliniowej odpowiada w przybliżeniu łopatce prostoliniowej odchylonej do przodu o  $20^\circ$ ).



Źródło: własne. Source: own study.

Rys. 3. Zależność przyspieszenia cząstki od czasu  $t$  na łopatkach: 1 – odchylonej do przodu o  $20^\circ$ , 2 – promienistej, 3 – odchylonej do tyłu o  $20^\circ$   
 Fig. 3. Dependence of particle acceleration on the time  $t$  for blades: 1 – inclined forwards at  $20^\circ$ , 2 – radial, 3 – inclined back at  $20^\circ$ .

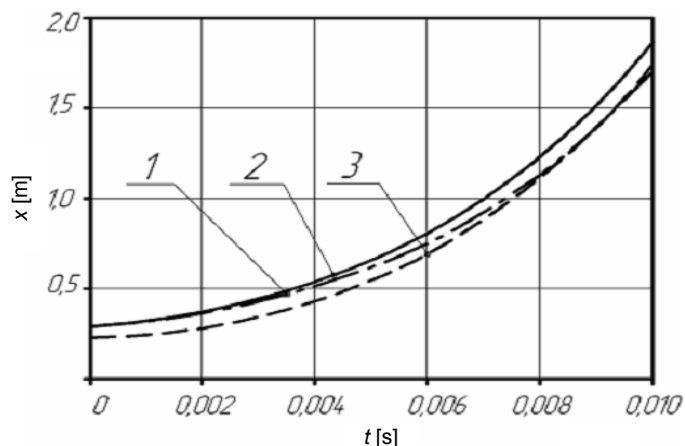


Źródło: własne. Source: own study.

Rys. 4. Zależność przyspieszenia cząstki od odległości  $x$  od wirnika na łopatkach: 1 – odchylonej do przodu o  $20^\circ$ , 2 – promienistej, 3 – odchylonej do tyłu o  $20^\circ$   
 Fig. 4. Dependence of particle acceleration on the distance  $x$  on the blade from the rotor: 1 – inclined forwards at  $20^\circ$ , 2 – radial, 3 – inclined back at  $20^\circ$ .

Z analizy wykresów (rys. 3 i 4) wynika, że przy wszystkich kształtach łopatek wentylatora  $\frac{N}{m} \geq 0$ , co świadczy o tym, że odrywanie cząstek od badanych łopatek następuje na ich brzegu. Po nałożeniu wykresów przemieszczania się cząstki w zależności od czasu  $t$ , wyznaczonych na podstawie równania (6) (rys. 5) na schemat z różnymi kształtami łopatek, uzyskano obraz ruchu

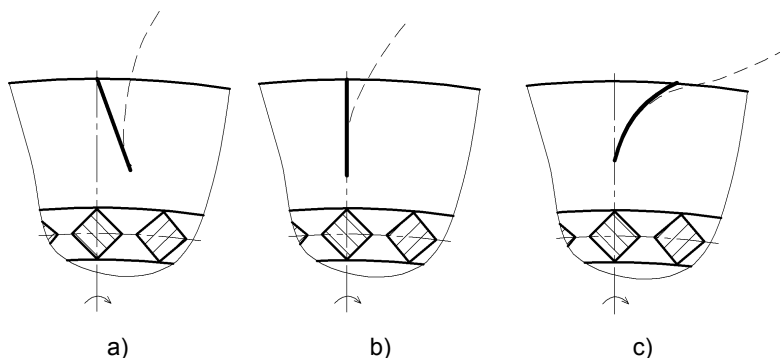
cząstki materiału na łopatkce (rys. 6). Można sądzić, że w wyniku różnic powierzchni kontaktu cząstek z łopatkami wentylatora o różnym kształcie, różny będzie także stopień zużycia łopatek.



Źródło: własne. Source: own study.

Rys. 5. Tor ruchu cząstki  $x$  po łopatkce: 1 – odchylonej do przodu o  $20^\circ$ , 2 – promienistej, 3 – odchylonej do tyłu o  $20^\circ$  w zależności od czasu  $t$

Fig. 5. Trajectory of  $x$  particle on the blade: 1 – inclined forwards at  $20^\circ$ , 2 – radial, 3 – inclined back at  $20^\circ$  depending on the time  $t$



Źródło: własne. Source: own study.

Rys. 6. Wyznaczone teoretycznie trajektorie ruchu cząstek na łopatkach: a – prostej odchylonej do tyłu o  $20^\circ$ , b – promienistej, c – krzywoliniowej odchylonej do przodu

Fig. 6. Theoretically determined particle trajectories after contact with the blade surface: a) straight, inclined back at  $20^\circ$ , b) radial, c) curvilinear, inclined forwards at  $20^\circ$ .

Należy zaznaczyć, że w czasie badań, na brzegach łopatek zauważono odciśki dużych cząstek rozdrabnianego ziarna, podobne do efektu obróbki przez rozdrabnianie, przy czym na łopatkach ustawionych promieniście od-

ciski były wyraźniejsze niż na łopatkach odchylonych do tyłu o  $20^\circ$ . Można to wyjaśnić w ten sposób, że w czasie pracy wentylatora, w warunkach dużej szybkości liniowej łopatek (rzędu  $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) i bardzo małego czasu przemieszczania się cząstek od jednej do drugiej łopatki ( $\Delta t = 0,0012 \text{ s}$ ), między łopatkami a cząstką materiału następują zderzenia, podczas których część cząstek przekazuje swoją energię, pozostawia charakterystyczny odisk na łopatce, ulega deformacji i rozpada się, a część – odbija się, po czym jest wciągana do wirowego strumienia powietrzno-materiałowego, a także poza jego obszar. Prawdopodobnie w przypadku łopatki ustawionej promiennie uderzenie następuje w linii zbliżonej do prostej, a w przypadku łopatki odchylonej do tyłu lub do przodu – przez ślizg. Siła z jaką cząstka działa na powierzchnię łopatki podczas zderzenia zależy od kąta nachylenia łopatki, co wyjaśnia różnice następstw zderzeń cząstek z łopatkami o różnym kształcie i ustawieniu.

## **Podsumowanie**

Analizując wyznaczone trajektorie ruchu cząstek na różnych łopatkach wentylatora (rys. 6), stwierdzono że powierzchnia kontaktu cząstek z powierzchnią łopatki jest największa w przypadku łopatki krzywoliniowej odchylonej do przodu, a najmniejsza – w przypadku prostej łopatki odchylonej do tyłu o  $20^\circ$ . Można teoretycznie sądzić, że w wyniku różnic powierzchni kontaktu cząstek z łopatkami wentylatora o różnych kształtach, różny będzie stopień zużycia łopatek w wyniku tarcia. Z literatury wiadomo, że odrywanie strugi powietrza z łopatki pogarsza aerodynamiczne wskaźniki i zmniejsza współczynnik sprawności wentylatora, jednak w przypadku rozdrabniacza, gdzie przemieszcza się mieszanka powietrzno-cząsteczkowa, ta właściwość umożliwia zmniejszenie powierzchni kontaktowego zużycia łopatek.

Przeprowadzone badania eksperymentalne ruchu cząstek materiału na łopatkach wentylatora rozdrabniacza o różnym kształcie potwierdziły obliczenia teoretyczne.

## **Wnioski**

1. Modelowanie ruchu cząstek materiału w strumieniu powietrza poza komorą rozdrabniacza według zaproponowanego algorytmu umożliwiło określenie trajektorii ruchu cząstek na powierzchni łopatek wentylatora w zależności od ich kształtu i ustawienia. Na tej podstawie stwierdzono, że najmniejsza jest powierzchnia kontaktu cząstek z łopatką odchylną do tyłu.
2. Wprowadzenie w model eksperymentalno-teoretyczny teorii zachowania pędu, umożliwiło pełniejszy opis zderzeń cząstek materiału z łopatką, a także uzasadniło zastosowanie łopatek odchylonych, umożliwiających przejście cząsteczek w warstwę powietrzno-materiałową bez uderzenia, co zmniejsza nakłady energetyczne na rozdrabnianie.

## Bibliografia

- Cherkasskij V.M. 1977. Nasosy, ventiljatory, kompressory. Moskwa. Wydawnictwo Energija ss. 268.
- Makarov E.G. 2007. Inženernye rasčety v Mathcad 14. Sankt Petersburg. Wydawnictwo ZAO „Piter” ss. 440.
- Romaniuk W. 1980. Mechanizacja produkcji zwierzęcej. Warszawa. PWRiL ss. 272.
- Savinyh P.A., Sychugov Ju.V., Turubanov N.V., Kas’janov V.L. Molotkovaja drobilka. Rossijskaja Federacija. Pat. 2317146. MPK7 V 02 S 9/00, V 02 S 13/04. № 2006121264/03. Zjavleno 15.06.2006. Opubl. 20.02.2008. Bjul. № 5. Moskwa. Wydawnictwo „Rospatent” ss. 7.
- Sysuev V.A., Aloskin A.V., Kormvikov A.D. 1997. Metody mechaniki v sel’skochozjajstvennoj technike. Kirov. Wydawnictwo „Kirovskaya oblastnaja tipografija” ss. 218.
- Sychugov N.P. 2000. Ventiljatory. Kirov. Wydawnictwo «Vjatka» ss. 228.

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES ON THE MOTION OF MATERIAL PARTICLES ON FAN BLADES IN DZ-4P HAMMER MILL

### Summary

Paper presents the results of theoretical and experimental studies on the work of hammer mill equipped with a fan for loading and unloading feedstuff material being ground. Fans with the blades of different shape and setting (the straight ones, set radially and inclined back, and the curvilinear, inclined forwards) were investigated. Equations were developed to determine contact places on the fan blades with particles of material being ground. Mentioned places are particularly liable to wear and tear. Compatibility of theoretical calculations with the results of experimental investigations was proved for wearing places on the fan blades of various shapes and deflection from circle radius.

**Key words:** hammer mill, fan, blades, wearing

Praca wpłynęła do Redakcji: 23.04.2010 r.

*Recenzenci: prof. dr hab. Józef Szlachta  
prof. dr hab. Stanisław Winnicki*

Adres do korespondencji:  
prof. dr hab. Wacław Romaniuk  
Instytut Technologiczno-Przyrodniczy  
Oddział w Warszawie  
ul. Rakowiecka 32, 02-532 Warszawa  
tel. 22 542-11-78; e-mail: w.romaniuk@itep.edu.pl