

Janusz KOTOWICZ

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechniki Śląskiej

PROGNOZOWANIE PYŁOWEJ EROZJI WIRNIKÓW WENTYLATORÓW PROMIENIOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono głównie problematykę zużycia erozyjnego na przykładzie wirnika wentylatora promieniowego. Główną uwagę skupiono na opracowaniu ogólnej metodologii ilościowego prognozowania ubytków erozyjnych łopatek oraz doskonaleniu metod obliczeniowych poszczególnych części algorytmów prognozowania. Przedyskutowano podstawowe elementy algorytmu. Przedstawiono przykłady zastosowania algorytmu oraz wyniki eksperymentu.

Ważniejsze oznaczenia:

- C_D - współczynnik oporu aerodynamicznego,
 C_V - współczynnik związania masy,
 \bar{D}_L - względna długość łopacki ($0 \leq \bar{D}_L \leq 1$),
 d_c, r_2 - średnica i promień cząstki,
 g - przyspieszenie grawitacyjne,
 ε_1 - powierzchniowy rozkład masy cząstek w przekroju wlotowym,
 ε_2 - powierzchniowy rozkład masy cząstek uderzających na łopatek,
 ε_u - udział masowy,
 \bar{H} - względna grubość łopacki ($0 \leq \bar{H} \leq 1$),
 h - głębokość erozji,
 I_v - intensywność zużycia erozyjnego,
 m - masa cząstki,
 m_v - masa gazu w objętości cząstki,
 p - ciśnienie statyczne gazu,
 r, θ, Z - promieniowa, obwodowa i osiowa współrzędna położenia cząstki,
 S - powierzchnia,
 V_c - wektor bezwzględnej prędkości cząstki,
 W - wektor względnej prędkości gazu,
 W_c - wektor względnej prędkości cząstki,
 W_t - całkowite erozyjne zużycie objętościowe,
 ν - lepkość kinematyczna gazu,
 ω - prędkość kątowna wirnika.

Indeksy:

- i - kolejne numery grup cząstek,
 j - kolejne numery strug elementarnych,
 r, θ , Z - składowe: promieniowa, obwodowa i osiowa,
 1, 2 - parametry w przekroju wlotowym i wylotowym.

1. Wstęp

W instalacjach energetyki zawodowej i przemysłowej, hutnictwie stali i metali kolorowych, przemyśle materiałów budowlanych i chemicznych poważne kłopoty eksploatacyjne sprawia erozja wentylatorów. Ogólnie szacuje się, że 20-25% maszyn przepływowych zainstalowanych we wszystkich gałęziach gospodarki narodowej wykorzystywanych jest do przetłaczania zapyłonego czynnika. Z danych przytoczonych w [1] wynika, że w siłowniach polskiej energetyki zawodowej przyczyną prawie połowy strat mocy spowodowanej awariami wentylatorów jest erozja układu łopatkowego.

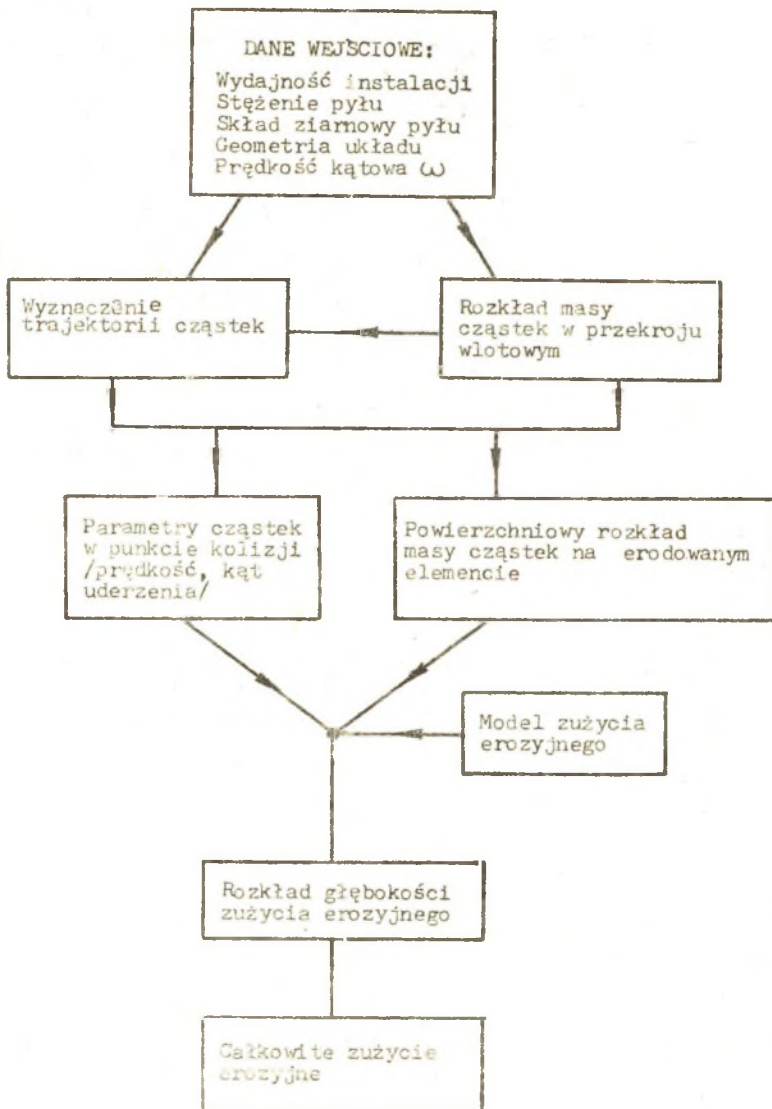
W prezentowanym artykule skupiono uwagę na badaniach zjawisk związanych z prognozowaniem zużycia erozyjnego. Umiejętność przewidywania wielkości ubytku erozyjnego w funkcji podstawowych parametrów przepływu oraz geometrycznych i materiałowych cech pyłu i wentylatora umożliwia ustalenie właściwych kryteriów eksploatacyjnych (głównie z uwagi na dyspozycyjność ruchową) oraz jest punktem wyjścia do optymalizacji konstrukcji.

2. Algorytm prognozowania zużycia erozyjnego

Algorytm prognozowania zużycia erozyjnego, w tym również maszyn przepływowych powinien zawierać następujące charakterystyczne elementy:

- obliczeniową metodę określenia trajektorii cząstki i jej prędkość w dowolnym polu prędkości fazy gazowej,
- sposób określenia dla danych charakteryzujących badany układ rozkładu masy cząstek na powierzchni łopatki,
- procedury obliczeniowe dla konkretnej geometrii układu łopatkowego umożliwiające wyznaczenie prędkości i kąta zderzenia z powierzchnią łopatki,
- wybór modelu zużycia erozyjnego. Wyznaczenie (teoretyczne lub eksperymentalne) charakterystyk zużycia erozyjnego materiałów konstrukcyjnych poddanych oddziaływaniu zapyłonego gazu,
- ustalenie za pomocą procedur wymienionych w punktach a-d wielkości zużycia erozyjnego układu łopatkowego. Ocena dopuszczalnego czasu pracy badanego układu łopatkowego.

Ogólny schemat blokowy algorytmu prognozowania zużycia erozyjnego przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Algorytm prognozowania zużycia erozyjnego

Fig. 1. Algorithm of the erosion wear prediction

Wszystkie wymienione składowe procesy obliczeniowe są ważne dla końcowego rezultatu, jakkolwiek o trafności prognozy decydują głównie:

- wiarygodność wybranego modelu zużycia erozyjnego materiału i poprawność wyznaczenia jego charakterystyk,
- dokładność wyznaczenia punktów kolizji cząstek z układem łopatkowym i parametrów cząstek w tych punktach.

3. Dynamika cząstek

Równania zachowania mieszaniny dwuskładnikowej gaz-cząstki stałe przedstawiono między innymi w [2, 3]. Jeżeli założymy małe stężenie cząstek stałych oraz brak wymiany ciepła i masy pomiędzy fazami to w konsekwencji nastąpi rozdzielanie zadania wyznaczenia warunków przepływu fazy gazowej od zadania określającego ruch cząstki. Założenia te są powszechnie stosowane przy analizie podobnych zagadnień w turbinach cieplnych [4] i sprężarkach [5, 6]. W tym przypadku równanie ruchu pojedynczej cząstki o masie m poruszającej się w fazie gazowej z prędkości V_c w nieruchomym układzie współrzędnych może być przedstawione w postaci:

$$m \frac{DV_c}{Dt} = - F_D + F_P + F_V + F_B + F_M + F_{MA} \quad (1)$$

Pierwsze wyrażenie po prawej stronie równania (1) określa siłę oporu aerodynamicznego spowodowaną ruchem cząstki względem fazy gazowej. Wyrażenie drugie jest siłą spowodowaną gradientem ciśnienia w otaczającym cząstkę gazie. Składnik trzeci określa tzw. siłę lokalnego przyspieszenia, a czwarty siłę Bassetta. Przedostatni składnik prawej strony równania (1) przedstawia siłę ciężkości a ostatni siłę Magnusa związaną z prędkością obrotową cząstki ω_c .

Dla wirującego kanału międzyłopatkowego wirnika wentylatora promieniowego wygodniej jest rozpatrywać ruch cząstki w układzie odniesienia związanym z wirującym kanałem, wówczas równanie (1) po uwzględnieniu postaci wszystkich rozpatrywanych sił przyjmuje postać [3]

$$\begin{aligned} m \frac{DW_c}{Dt} = & - \frac{3m_v \cdot C_D}{8 r_c} (W_c - W) |W_c - W| - \frac{m_v}{\rho_g} \text{grad } p + m_v c_v \frac{D(W - W_c)}{Dt} + \\ & + \frac{9m_v}{2r_c} \sqrt{\frac{\nu}{\pi}} \int_0^t \frac{D(W - W_c)}{Dt} \cdot \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} d\tau + mg + \\ & + \frac{3}{4} m_v \omega_c \times (W_c - W) - 2m(\omega \times W_c) - m[\omega \times (\omega \times r)] \end{aligned} \quad (2)$$

W prawej części równania (2) ostatnie dwa człony przedstawiają odpowiednio efekt Coriolisa i siłę odśrodkową.

Rozwiązanie przedstawionego równania (2) wymaga wcześniejszego określenia pola prędkości fazy gazowej. Opracowanie numerycznych metod rozwiązania tego zagadnienia w przypadku przepływu w kanałach międzyłopatkowych wentylatorów promieniowych stanowi temat szeregu prac np. [7, 8]. Analiza wartości poszczególnych składowych sił pozwala rozpatrywać równanie (2) istotnie uprościć. Uzyskane rezultaty obliczeń [3] uzasadniają pominięcia w równaniu ruchu cząstek sił F_p , F_v , F_B , F_M , F_{MA} ; w tym również dla przypadku rozpatrywania ich ruchu w kanale międzyłopatkowym wentylatora promieniowego. W konsekwencji przedstawione równanie wektorowe (2) można doprowadzić w układzie współrzędnych walcowych (wirującym) do układu następujących równań różniczkowych

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r}{dt^2} &= - \frac{3m_v}{8m_r c} C_{Dr} \left(\frac{dr}{dt} - W_r \right) \left| \frac{dr}{dt} - W_r \right| + \left(\omega + \frac{d\theta}{dt} \right)^2 r \\ r \frac{d^2 \theta}{dt^2} &= - \frac{3m_v}{8m_r c} C_{D\theta} \left(r \frac{d\theta}{dt} - W_\theta \right) \left| r \frac{d\theta}{dt} - W_\theta \right| - 2 \left(\omega + \frac{d\theta}{dt} \right) \frac{dr}{dt} \\ \frac{d^2 z}{dt^2} &= - \frac{3m_v}{8m_r c} C_{Dz} \left(\frac{dz}{dt} - W_z \right) \left| \frac{dz}{dt} - W_z \right| \end{aligned} \quad (3)$$

Metody rozwiązania równania ruchu cząstki przedstawiono w [3]. Uproszczone równanie ruchu cząstki wraz z odpowiednim systemem równań określających pole prędkości w fazy gazowej tworzy najczęściej stosowany w badaniach erozji model przepływu czynnika dwufazowego. Rozwiązanie równania ruchu cząstki umożliwia określenie zarówno jej trajektorii, jak i parametrów cząstki w punkcie kolizji z układem łopatkowym. Poprawność rozpatrywanego modelu ruchu cząstki w kanałach międzyłopatkowych wentylatora promieniowego sprawdzono częściowo na drodze eksperymentu, który przeprowadzono w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej i obszernie przedstawiono w [3]. W badaniach wykorzystano uproszczoną metodologię określenia zużycia erozyjnego polegającą na obserwacji intensywności ścierania wielowarstwowej powłoki nałożonej na łopatkę (kilka warstw różnokolorowych farb).

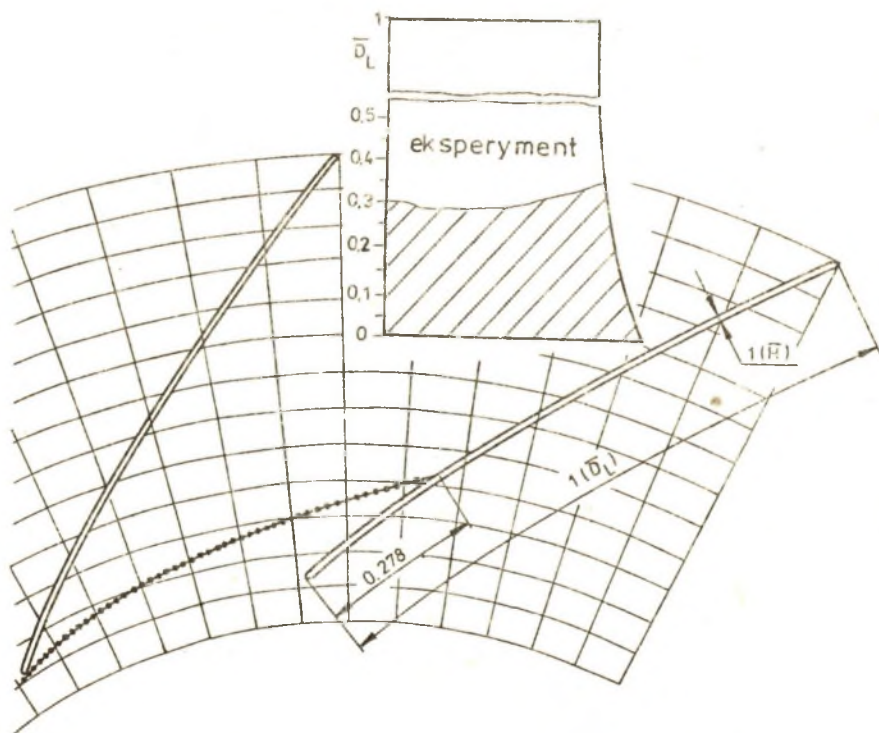
Do badań użyto wirnika wentylatora promieniowego o następujących charakterystycznych wielkościach:

średnica wylotowa wirnika	-	0,56 m,
średnica wlotowa wirnika	-	0,315 m,
średnica wlotowa łopatek	-	0,328 m,
wylotowa szerokość wirnika	-	0,084 m,
wlotowy kąt łopatkowy	-	30°,
wylotowy kąt łopatkowy	-	50°,

liczba łopatek - 12,
 promień łuku - 0,6703 m,
 promień środków promieni - 0,5407 m.

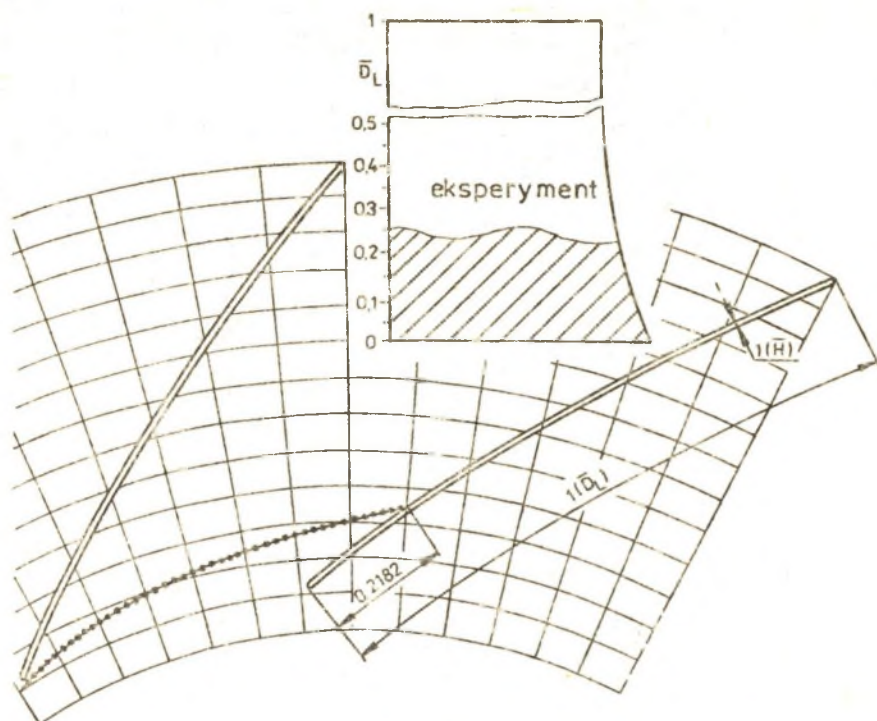
Podczas przeprowadzania eksperymentu w instalacji utrzymywano stałą wydajność równą nominalnej ($1,5 \text{ m}^3/\text{s}$). Jako czynnika ścierającego użyto piasku kwarcowego o ściśle określonych średnicach ziarn $0,32 < d_c < 0,5$ lub $0,1 < d_c < 0,2$ (mm), którego koncentrację utrzymywano na stałym poziomie równym 3 g/m^3 .

W wyniku badań otrzymano rzeczywisty zakres padania cząstek stałych na łopatki wirnika i porównano go z zakresem otrzymanym w wyniku numerycznego rozwiązania rozpatrywanego modelu ruchu cząstek. Rezultaty porównania przedstawiono na rys. 2 i rys. 3.



Rys. 2. Obliczeniowy i eksperymentalny zakres padania cząstek $0,1 < d_c < 0,2$

Fig. 2. Computational and experimental range of falling of particles $0,1 < d_c < 0,2$



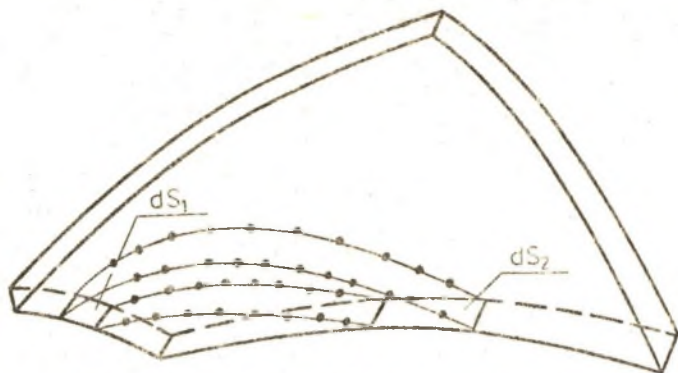
Rys. 3. Obliczeniowy i eksperymentalny zakres padania cząstek
 $0,32 < d_c < 0,5$

Fig. 3. Computational and experimental range of falling of particles
 $0,32 < d_c < 0,5$

4. Rozkład masy uderzających cząstek na powierzchni łopatki

Dane charakteryzujące rozpatrywaną instalację (wydajność i stężenie) oraz znany skład ziarnowy cząstek pozwalają ustalić rozkład masy cząstek w przekroju wlotowym układu łopatkowego (ε_1). W obliczeniach numerycznych wygodnie jest wyodrębnić ze składu ziarnowego "k" grup cząstek o promieniach zawartych w przedziałach $r_{ci} - \Delta r_c < r_{ci} < r_{ci} + \Delta r_c$ ($i = 1, \dots, k$), jak również wyodrębnić na powierzchni wlotowej strugi elementarne "j" $j = (1 \dots L)$ o powierzchni dS_1 (rys. 4). Tak więc po ustaleniu powierzchniowego rozkładu masy cząstek ε_{1ij} można określić rozkład masy cząstek z grupy "i" oraz powierzchni "j" na łopacie wg zależności

$$\varepsilon_{2ij} = \left[\varepsilon_1 \cdot \mathcal{X} \cdot \left(\frac{dS_1}{dS_2} \right) \right]_{ij} \quad (4)$$

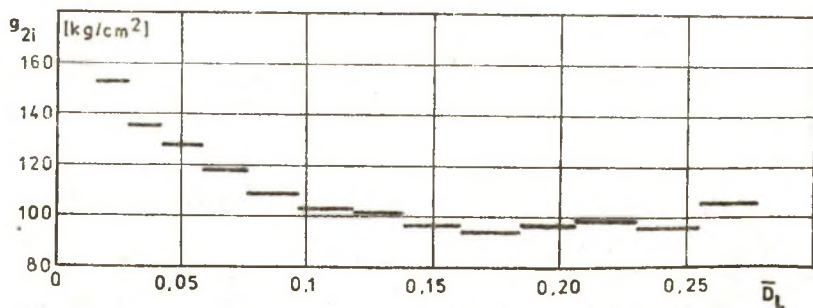


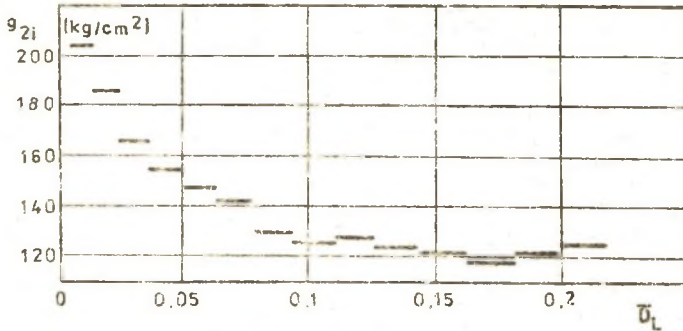
Rys. 4. Określenie powierzchni elementarnych

Fig. 4. Definition of elementary surfaces

W równaniu (4) \mathcal{E}_{ij} jest tzw. współczynnikiem separacji określającym stosunek liczby cząstek o ustalonym promieniu r_{c1} , która uderzy o powierzchnię łopaty do liczby wszystkich cząstek o tym promieniu z "j" tej powierzchni elementarnej. Wartości \mathcal{E}_{ij} jak również $\left(\frac{dS_1}{dS_2}\right)_{ij}$ wyznacza się przy wykorzystaniu trajektorii cząstek otrzymanych w drodze rozwiązania ich równania ruchu.

Rozwiązanie równania (4) dla określonego "i" w całym przedziale zmienności "j" ($j = 1 \dots L$) pozwala określić zależność rozkładu powierzchniowego wymienionej grupy cząstek w funkcji długości łopaty. Postępując w ten sam sposób dla wszystkich grup cząstek otrzymujemy "K" takich zależności. Dokonując sumowania wartości otrzymanych zależności wzdłuż długości łopaty otrzymamy powierzchniowy rozkład masy pyłu na łopacie $g_2 = f(D_L)$. Obliczony rozkład masy cząstek wzdłuż łopaty dla danych charakteryzujących przeprowadzony i opisany wcześniej eksperyment przy założeniu czasu pracy instalacji 4000 h przedstawiono na rys. 5 i rys. 6.

Rys. 5. Rozkład masy cząstek wzdłuż długości łopaty dla $0,1 < d_c < 0,2$ Fig. 5. Distribution of masses of particles across the length of blades for $0,1 < d_c < 0,2$



Rys. Rozkład masy cząstek wzdłuż długości łopaty dla $0,32 < d_o < 0,5$

Fig. 6. Distribution of masses of particles across the length of blades for $0,32 < d_o < 0,5$

5. Określenie wielkości zużycia erozyjnego łopaty. Przykłady

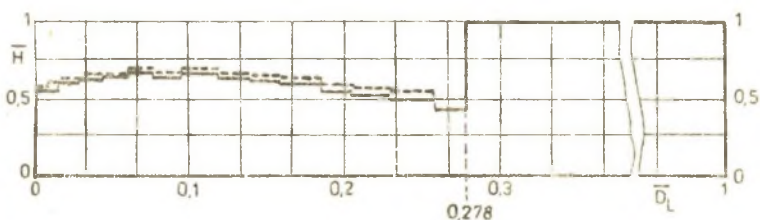
Miarą wielkości erozji jest intensywność zużycia erozyjnego I_v , którą określa stosunek usuniętej objętości materiału do masy uderzających cząstek. Wielkość ta jest funkcją wielu czynników, w tym głównie: średnicy, kształtu i stężenia uderzających cząstek ich prędkości i kąta padania, właściwości mechanicznych i fizycznych cząstek i materiału erodowanego. Spotykane w literaturze modele zużycia erozyjnego pozwalają określić intensywność zużycia erozyjnego w funkcji wymienionych czynników. Zasadniczo istnieją cztery grupy modeli zużycia erozyjnego, przegląd wszystkich zawiera między innymi [3]. Prezentowane tam modele zawierają współczynniki i parametry których wielkość ustala się w oparciu o wyniki systematycznych badań eksperymentalnych interesujących nas materiałów i pyłów. W przedstawionym artykule obliczenia intensywności erozji dokonano w oparciu o model Bittera [9] z uproszczeniami podanymi przez Neila na i Gilchrista [10] oraz model Beckmanna [11, 12]. W obu przypadkach do określenia intensywności zużycia erozyjnego niezbędna jest znajomość prędkości i kąta w chwili uderzenia oraz charakterystycznych dla każdego z modeli współczynników i parametrów. Wprowadzenie intensywności zużycia erozyjnego oraz powierzchniowego rozkładu masy cząstek na łopacie umożliwia określenie głębokości erozji łopaty. Głębokość erozji spowodowana cząstkami o promieniu r_{ci} z grupy "i" w "j"-tej strudze na powierzchni dS_2 (rys. 4) można określić z zależności

$$h_{ij}^E = \epsilon_{2,ij} I_{v,ij} \tag{5}$$

Postępując analogicznie jak w przypadku określenia $s_2 = f(D_L)$ można określić obraz głębokości erozyjnego zużycia łopatkı wzdłuż jej długości $h^E = f(D_L)$. W przypadku poszukiwania integralnego zużycia objętościowego skorzystamy z zależności

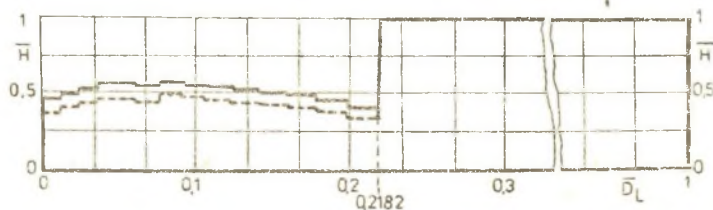
$$W_t = \sum_{i=1}^{l=k} \left(\sum_{j=1}^{j=L} h_{ij}^E d s_{2ij} \right) \quad (6)$$

Na podstawie przedstawionego na rys. 1 algorytmu i przy wykorzystaniu podanych zależności dokonano obliczeń obrazu zużycia erozyjnego łopatkı badanego wentylatora promieniowego [3]. Obliczenia przeprowadzono dla takich samych warunków przepływowych jak w przeprowadzonym eksperymencie i przy założeniu czasu pracy instalacji 4000 h oraz stopu AK10 jako tworzywa łopatek. Zmianę względnej grubości łopatkı wzdłuż jej długości przy wykorzystaniu zarówno zależności Beckmanna jak i Bittera przedstawiają rysunki 7 i 8.



Rys. 7. Zmiana grubości łopatkı wyznaczona przy wykorzystaniu modelu Bittera (linia przerywana) i Beckmanna (linia ciągła) dla $0,1 < d_c < 0,5$

Fig. 7. Change of thickness of blades assigned using Bitter and Beckmann models for $0,1 < d_c < 0,2$



Rys. 8. Zmiana grubości łopatkı wyznaczona przy wykorzystaniu modelu Bittera (linia przerywana) i Beckmanna (linia ciągła) dla $0,32 < d_c < 0,5$

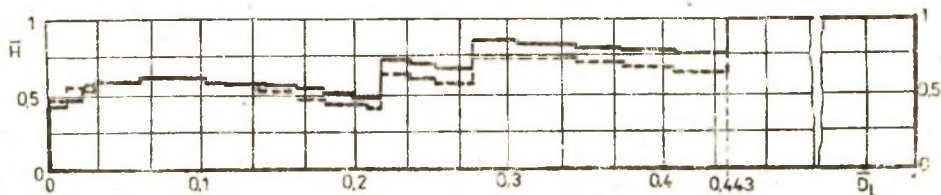
Fig. 8. Change of thickness of blades assigned using Bitter and Beckmann models for $0,32 < d_c < 0,5$

Dokonano również obliczeń morfologii zużycia erozyjnego łopatki przy hipotetycznym jej oddziaływaniu z pyłem trójskładnikowym o składzie:

$d_c = 0,41$ mm (udział masowy $\xi_u = 30\%$), $d_c = 0,15$ ($\xi_u = 30\%$) i $d_c = 0,045$ ($\xi_u = 40\%$).

W tym przypadku ponadto założono: stężenie pyłu 10 g/m^3 , wydajność równa nominalnej instalacji badawczej, i czas pracy 1500 godzin.

Wyniki obliczeń pokazano na rys. 9.



Rys. 9. Zmiana grubości łopatki wyznaczona przy wykorzystaniu modelu Bittera (linia ciągła) i Beckmanna (linia przerywana) dla pyłu wieloskładnikowego

Fig. 9. Change of thickness of blades assigned using Bitter and Beckmann models for multicomponents dust

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono model zużycia erozyjnego łopatek wentylatora promieniowego. Na podstawie porównania rezultatów badań eksperymentalnych z obliczeniami przeprowadzonymi zgodnie ze wspomnianym modelem stwierdzono zgodność zasięgu występowania erozji obliczeniowej z wyznaczoną eksperymentalnie. W ten sposób badania potwierdziły przydatność stosowanego modelu analitycznego ruchu cząstek, zwłaszcza w procesie badania zużycia erozyjnego.

Przedstawiony w niniejszym artykule algorytm pozwala na wyznaczenie zużycia erozyjnego łopatek wentylatora promieniowego poddanym oddziaływaniu pyłu wielofrakcyjnego. Opracowana metoda pozwala na prognozowanie morfologii zużycia erozyjnego łopatek wentylatora promieniowego zarówno dla istniejących konstrukcji, jak i w procesie projektowym.

Ważnym problemem przy prognozowaniu erozji jest wybór zależności wiążącej zużycie erozyjne materiału łopatki z prędkością cząstki, kątem padania oraz innymi parametrami. Przedstawione w artykule wyniki oparto na dwóch modelach Bittera/Neilsona, Gilchrista/ oraz Beckmanna. Każdy z nich ma swoje wady i zalety, a otrzymane wyniki nie różnią się w sposób istotny.

Pierwszy model wymaga przeprowadzenia szerokiego eksperymentu, drugi jest bardziej uniwersalny lecz mało czuły na zmianę średnicy cząstek pyłu. W miarę poszerzenia i zdobywania doświadczeń o zużyciu erozyjnym oba modele mogą być bardzo przydatne.

LITERATURA

- [1] Radwański J.: Erozja pyłowa wirników wentylatorów przemysłowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka z. 72/79.
- [2] Chmielniak T. i inni: Badania erozji w wentylatorach. Prace IMiUE, Gliwice 1980.
- [3] Kotowicz J.: Pyłowa erozja wirników wentylatorów promieniowych. Praca doktorska. Gliwice 1986.
- [4] Chmielniak T.: Analiza niektórych zjawisk charakterystycznych dla stopnia turbiny pracującej w obszarze pary mokrej. ZN Politechniki Śląskiej, Energetyka z. 44/72.
- [5] Hussein M.F., Tabakoff W.: Computation and Plotting of Solid Particle Flow in Rotating Cascades. Computers and Fluids, Vol 2, 1-15. Pergamon Press, 1974.
- [6] Tabakoff W., Hussein M.F.: Trajectories of Suspended in Fluid Flow Through Cascade. AIAAJ 8, 60-62, 1971.
- [7] Katsanis T.: A Computer Program for Calculating Velocities and Streamlines on a Blade - to - Blade Stream Surface of a Turbomachine. NASA TN D-4525, 1968.
- [8] Otte J.: Metoda analizy przepływu przez układy łopatkowe maszyn wirnikowych. Praca doktorska. Gliwice, 1976.
- [9] Bitter J.C.A.: A Study of Erosion Phenomena, Wear, Vol 6, Part II 169-190, 1963.
- [10] Neilson J.H., Gilchrist A.: Erosion by Stream of Solid Particle, Wear, Vol 1, 123-143, 1968.
- [11] Beckmann G., Gotzmann J.: Analytical Model of the Blast Wear Intensity of Metals based on a General Anangement for Abrasive Wear, Vol 73, 325-353, 1981.
- [12] Beckann G.: A Theory of Abrasive Wear Based on Shear Effects in Metal Surfaces, Wear, Vol 59, 421-432, 1980.

Recenzent: Doc. dr inż. Jan Radwański

Wpłynęło do redakcji w czerwcu 1987

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЫЛЕВОЙ ЭРОЗИИ РОТОРОВ
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРНЫХ МАШИН

Резюме

В работе обсуждена проблема эрозионного износа на примере рабочих колёс центробежных компрессорных машин. Главное внимание обращено на разработку методологии и алгоритма вычисления и прогнозирования эрозии лопаток рабочих колёс. Представлена структура алгоритма. Показаны примеры применения вычислительного метода и результаты исследований эрозионного износа.

PREDICTION OF EROSION WEAR OF A RADIAL FAN IMPELLER

Summary

The paper mainly deals with the problems of erosion wear of radial fan impellers. The attention is paid to establish general methodology of the quantitative prediction of erosion loss on blades as well as to improve calculation methods of particular parts of prediction algorithm. Basic elements of the algorithm are discussed. Examples of the application of the algorithm are presented.