

Stanisław FORTUNA

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica
w Krakowie

POMPAŻ W PROMIENIOWYM WENTYLATORZE SSACYM

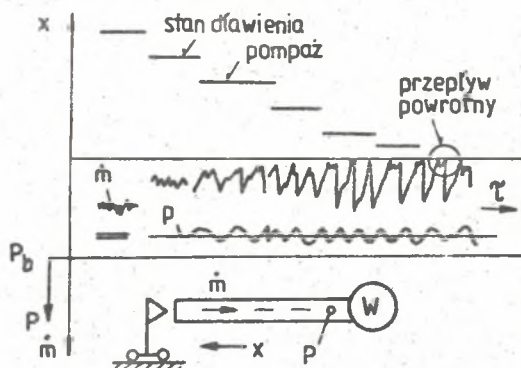
Streszczenie. W pracy przedstawiono badania pompażu powstającego w wentylatorze promieniowym, którego charakterystyka jest nieciągła w pobliżu wierzchołka ciśnienia. Rozpatrzono zjawiska histerezy jako skutek oderwania wirującego oraz wprowadzono kryterium nieciągłości charakterystyki w postaci funkcji parametrów geometrycznych u wlotu i wylotu z wirnika.

1. Wstęp

W większości wentylatorów zjawisko pompażu przebiega łagodnie lub nie zachodzi wcale, jednak spotyka się takie wentylatory, w których zjawisko to jest bardzo intensywne a ujemne skutki jego pojawienia się obniżają walory eksploatacyjne maszyny. Należy podkreślić, że wysokie sprawności wentylatora nie wykluczają istnienia pompażu. Optymalne, ze względu na sprawność, parametry geometryczne dla częściowego obciążenia wirnika dopuszczają do powstania zjawisk pompażowych. W artykule zajęto się pompażem w obszarze, w którym istnieje nieciągłość charakterystyki. Zjawisko badano na stanowisku z rurą pomiarową na ssaniu, wyznaczając rozkłady ciśnień w rurze dolotowej i komórce wlotowej wirników o różnej szerokości. Zaproponowano także kryterium nieciągłości krzywej dławienia.

2. Cykl pompażowy w układzie ssacym

Pompażem nazywa się drgania masy gazu w rurociągu i w maszynie przepływowej, którym towarzyszy dudnienie fali dźwiękowej. Efekt akustyczny kojarzy się z częstotliwością pracy pompy tłokowej dlatego pulsacje strumienia gazu i ciśnienia nazywa się pompowaniem /pompaż/. Przy pompowaniu przepływ jest niestateczny i można go rozpatrywać jako okresowy. Typowy cykl pompażowy przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Jest to opis zjawiska w funkcji czasu τ i wydatku \dot{m} .



Rys.1. Pulsacje pompażowe strumienia masy i ciśnienia

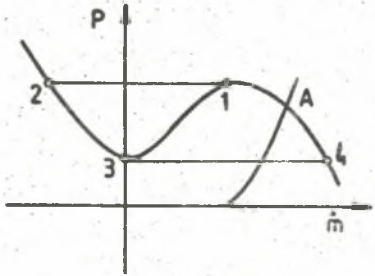
Wykresem zależności ciśnienia P od strumienia masy \dot{m} w obszarze pompażu jest parabola 3 stopnia z minimum w punkcie $\dot{m} = 0$, zaś maksimum znajduje się w sąsiedztwie oderwania. Jeśli punkt pracy A wypada w okolicach maksymalnego podciśnienia wówczas bez wyraźnej przyczyny, czyli bez ingerencji z zewnątrz dochodzi do pompażu. Punkt pracy skacze na ujemną gałąź charakterystyki, powracając przez przepływ zerowy do punktu normalnej pracy, w którym następuje ssanie powodujące ponowny wierzchołek ciśnienia i powtórzenie się cyklu, w którym realizuje się obieg punktów 1, 2, 3, 4 do 1.

Wyniki badań anemometrycznych [3] uwiadczniają przepływy powrotne /rys.1/. W wentylatorze ssącym nie dosięgają one komory wlotowej wirnika i zachodzą pomiędzy obudową spiralną a wirnikiem. Cykl pompażowy zależy od stanu dławienia, charakterystyki wentylatora i instalacji. Ze względu na małe obciążenia mocą opisany model pompażu przebiega w wentylatorze łagodnie i bezpiecznie.

3. Nałożenie oderwania wirującego

Nieciągłość charakterystyki jest skutkiem wystąpienia oderwania wirującego [5]. Dotychczas nie zostało wyjaśnione czy oderwanie wirujące inicjuje pompaż, czy relacja jest odwrotna. Więcej własnych dowodów eksperymentalnych przemawia za drugą alternatywą, gdyż oderwanie ma miejsce po przekroczeniu, wierzchołka ciśnienia. Z badań wy-

nika, że w rodzinie wirników o zmiennej szerokości punkt wierzchołkowy w stosunku do optymalnego ciśnienia dla stałych obrotów, układa się tak jak to pokazują wartości \dot{V}_g/\dot{V}_{opt} podane w tabeli 1. Ze wzrostem obrotów oddalenie wzajemnie omawianych punktów powiększa się. Dowodzi to, że punkt wierzchołkowy wentylatora z nieciągłością nie uległ przesunięciu lecz jest w swoim miejscu wynikającym z wartości $\dot{V}_g/\dot{V}_{opt} = 0,62$.

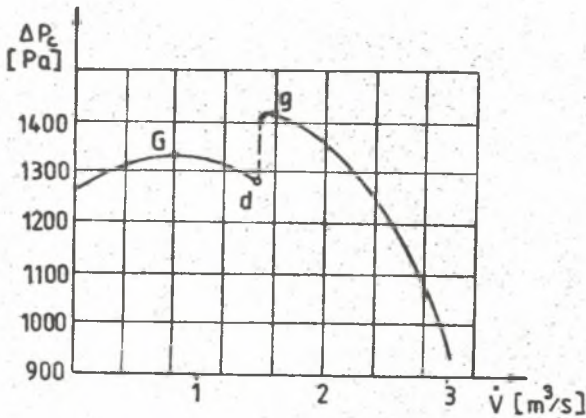


Rys.2. Typowy cykl pompażowy

Tabela 1

Wirnik	b_1/D_1	\dot{V}_g/\dot{V}_{opt}		
		$n = 690 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$	$n = 940 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$	$n = 1420 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$
a	0,28	0,69	0,66	0,61
b	0,34	0,68	0,65	0,61
c	0,41	0,68	0,65	0,62

Nieciągłość i towarzyszące jej oderwanie wirujące powodują wystąpienie drugiego wierzchołka oznaczonego na wykresie charakterystyki literą G - rysunek 3. Na linii kreskowej nie może znajdować się punkt pracy, gdyż nie ma tu punktu przecięcia linii z charakterystyką sieci lecz co najwyżej wzajemna styczność. Od linii przerywanej zaczyna się silny pompaż. Można zatem mówić o nałożeniu wzajemnym pompażu i skutków oder-



Rys.3. Krzywa ciśnienia z punktem nieciągłości

wania, co doprowadza do znacznego zwiększenia drgań tak dalece, że są one niebezpieczne dla wytrzymałości wirnika i uciążliwe akustycznie.

Oderwanie wirujące na co wskazuje eksperyment przebiega z histerezą mocy. Przyczyną zjawisk histerezy w rzeczywistym układzie jest tarcie. Pole pętli histerezy określa energię straconą w zjawisku. Na rysunku [4] przedstawiono straty przy różnych obrotach wirnika. Wyraża się je wzorem

$$N_{str} = (P_g - P_d) \dot{v}_d \cdot (\dot{v}_g - \dot{v}_d) \quad /1/$$

W oderwaniu wirującym jest akumulowana moc wyliczona ze wzoru

$$N_a = \dot{v}_d \cdot (P_g - P_d) \dot{v}_d \quad /2/$$

zaś stosunek mocy akumulowanej do mocy użytecznej wynosi

$$\eta = \frac{(P_g - P_d) \dot{v}_d}{(P_g) \dot{v}_d} \quad /3/$$

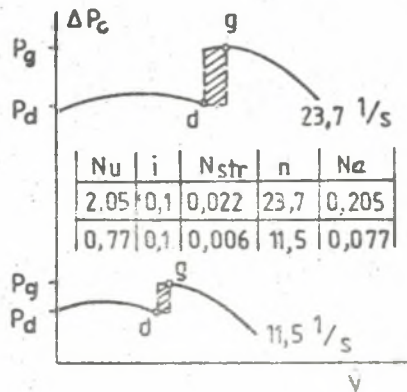
Obciążenie jednego kanału międzyłopatkowego jest porównywalne liczbowo z mocą akumulowaną w oderwaniu i wynosi

$$\frac{N_u}{z} = \frac{(\dot{V}_g \cdot P_R)}{z} \dot{V}_d \quad /4/$$

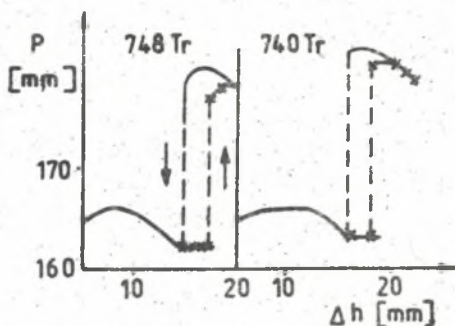
Do zniszczenia oderwania potrzebny jest przyrost strumienia objętości,

$$\dot{V}_g - \dot{V}_d \quad /5/$$

zrealizowany drogą odciążenia ssania. Sam powrotny skok ciśnienia zachodzi gwałtownie objawiając się również wyciszeniem przepływu, gdyż ustępuje dudnienie. Zamyka się w ten sposób pętla histerezy. Różny ma kształt zależy on między innymi od panującego ciśnienia barometrycznego, co przedstawiono na rysunku 5. Z obliczeń własnych wynika, że około 10 % energii użytecznej akumuluje się w oderwaniu, zaś około 1 % energii użytecznej jest zniszczony na straty tarcia.



rys.4. Strata tarcia w oderwaniu wirującym



Rys.5. Przebiegi histerezy mocy

4. Geometryczne kryterium wystąpienia nieciągłości

Na podstawie badań własnych trzech wirników stwierdzono, że jako kryterium występowania nieciągłości może służyć nierówność

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\operatorname{tg} \beta_2}{S-1} < \operatorname{tg} \beta_1 \quad /6/$$

Wzoru na $\operatorname{tg} \alpha_2$ nie można wyprowadzić na podstawie rozwiązania równania płaskiego ruchu względnego. Liczba Rosby'ego wyprowadzona jest z tego równania i może być przybliżonym kryterium niestabilności jeśli doświadczalnie ustali się jej graniczną wartość.

W pracach [5 i 6] podano $Ro_{gr} \approx 5$ i zastosowano jako kryterium. Teoretycznie nie można zbadać istoty warunku /6/ i porównać z liczbą Rosby'ego gdyż jest innej natury i wynika on z uproszczonej analizy przepływu bezwzględnej. Kąt nachylenia prędkości bezwzględnej C_2 oblicza się z relacji

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{C_{2m}}{C_{2u}} \quad /7/$$

Podstawiając geometryczne związki wyrażające stosunek

$$\frac{C_{2m}}{C_{1m}} = \frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{b_1}{b_2} \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1} \quad /8/$$

oraz

$$C_{2u} = U_2 - \frac{C_{2m}}{\operatorname{tg} \beta_2} \quad /9/$$

$$C_{1m} = U_1 \operatorname{tg} \beta_1 \quad /10/$$

$$S = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \cdot \frac{b_2}{b_1} \cdot \frac{\operatorname{tg} \beta_2}{\operatorname{tg} \beta_1} \cdot \frac{\tau_1}{\tau_2} \quad /11/$$

obliczamy $\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\operatorname{tg} \beta_2}{S-1} \quad /12/$

Dla wentylatorów własnych i z publikacji /6/ obliczono wartości kryteriów, czyli wzór /12/ oraz liczbę Rosby'ego dla warunków u wlotu i dla optymalnej liczby wydajności φ_0 .

$$Ro = \frac{w_{\text{śr}}}{\omega \cdot t \cdot \sin \beta_1} \quad /13/$$

Ocena nieciągłości według omawianych kryteriów wykazała dużą zgodność wyników. W tabeli 2 przytoczono wyniki przeliczeń, które potwierdziły praktyczną przydatność kryteriów.

Tablica 2

Wirnik	$\operatorname{tg} \beta_1$	$\frac{\operatorname{tg} \beta_2}{8-1}$	Nieciągłość wg wzoru 6	$R_0 / 6/$
a	0,1405	0,141	n	10,5
b	0,1405	0,128	w	10,1
c	0,1405	0,122	w	10,3
27	0,3443	0,33	w	6,66
31	0,3443	0,33	w	9,34
23	0,3640	0,73	n	2,78
43	0,3640	0,52	n	3,88
45	0,3443	0,28	w	6,4
46	0,3443	0,28	w	9,72
35	0,6745	0,73	n	2,68
36	0,3640	0,45	n	4,14
37	0,3443	0,27	w	6,94
38	0,3443	0,25	w	9,67
39	0,3443	0,25	w	5,52
42	0,5774	0,38	w	4,9

w - nieciągłość występuje n - brak nieciągłości

5. Podsumowanie

Zjawisko pompażu bez towarzyszących mu zjawisk histerezowych zachodzi w wentylatorze w sposób łagodny. Nałożenie się na typowy proces pompażu pulsacji oderwania wirującego czyni dopiero proces niebezpieczny i uciążliwy.

Struktura i geneza oderwania wirującego nie są dostatecznie poznane. Ilość akumulowanej energii w oderwaniu świadczy o wielkości struktury w odniesieniu do przepływu łopatkowego. Oderwanie jest skutkiem a nie przyczyną pompażu.

Wszystkie główne wymiary wirnika, obudowy i instalacji, tak jak kształtują przepływ ciągły, formują także przepływ z nieciągłością. Zmiana jednego parametru geometrycznego może być wystarczająca do zabezpieczenia przed nieciągłą charakterystyką.

Zaproponowane kryterium nieciągłości mimo swej prostoty może spełnić swą rolę w eliminowaniu konstrukcji o charakterystykach rozerwanych.

Literatura

- [1] Wachter J. i inni : Beitrag zur Untersuchung des instationären Betriebsverhaltens von Verdichteranlagen an der Pumpgrenze und während des Rumpes. VDI - Berichte 361, 1980.
- [2] Szewalski R.: Dynamiczna teoria zjawiska pompowania w sprężarce wirnikowej. Archiwum Budowy Maszyn T.I. 1954 r. z. 1.
- [3] Carolus Th. Kulmann L.: The theoretical and experimental determination of surge in Fan System. Proceedings of the 7 Conference FM Vol.I, Budapest 1983.
- [4] Fister W.: Sichtbarmachung der Strömungen in Radialverdichterstufe ... Brennstoff - Wärme - Kraft 18. 1966 nr 9.
- [5] Radwański J.: Stabilność charakterystyk wentylatorów promieniowych. ZN. Pol. Śląskiej s. Energetyka, 1978.
- [6] Polok J.: - Kryterium stabilności charakterystyk wentylatorów promieniowych. ZN Pol. Śląskiej s. Energetyka z.76, 1980.
- [7] Tuliszka E.: Sprężarki, dmuchawy, wentylatory. WNT, Warszawa 1976.
- [8] Sentek J., S.Fortuna: Modelluntersuchungen an V-entilatoren HLH 28 /1977/ Nr 11.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielniak

Wpłynęło do redakcji maj 1985 r.

ПОМПАЖ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ВСАСЫВАЮЩЕМ ВЕНТИЛЯТОРЕ

Резюме

В работе представлены результаты исследований помпажа, возникающего в центробежном вентиляторе, которого характеристика, вблизи вершинной точки, разрывается. Рассмотрены явления гистерезиса в зоне помпажа, как результат вращающегося отрыва. Введен критерий непостоянности характеристики в виде функции геометрических параметров у входа и выхода ротора.

SURGE POINT OF RADIAL SUCTION FANS

Summary

This paper presents results of investigations of the surge points of a radial fan whose characteristic is discontinuous near the apex. The phenomena of hysteresis in the surge point area are considered as the result of rotating stall. The criterion of the characteristic's discontinuity is introduced in the form of a function of geometric parameters of the rotor inlet and exit.