ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1979

Seria: ENERGETYKA z. 72 Nr kol. 604

Janusz ŁAPA

OBR "Barowent" Katowice

WYBRANE ZAGADNIENIA DUŻYCH WENTYLATORÓW KOTŁOWYCH

Streszczenie. Omówiono kierunki rozwoju wentylatorów kotłowych, nowe metody projektowania wirników oraz dynamikę pracy dużych wentylatorów, w szczególności zagadnienia drgań.

1. Kierunki rozwojowe

W latach siedemdziesiątych rozpowszechniło się stosowanie osiowych wentylatorów kotłowych dla tłoczenia powietrza i spalin [11]. Czy trend ten utrzymuje się nadal?

W Republice Federalnej Niemiec - tak; we Francji nastąpiło pewne przyhamowanie spowodowane trudnościami eksploatacyjnymi wentylatorów z łopatkami wirnika sterowanymi podczas ruchu, jednak stosuje się je nadal [23]; w Wielkiej Brytanii dominują tradycyjnie wentylatory promieniowe. W ZSRR coraz częściej stosuje się wentylatory osiowe, przy czym są to przeważnie reakcyjne jedno- i dwustopniowe wentylatory z regulowanymi kierownicami; została jednak zakupiona licencja na wentylatory powietrza z regulowanymi hydraulicznie łopatkami wirnika. W Kanadzie [21] w okresie 1971-1977 sprzedano 26 wentylatorów osiowych z regulowanymi łopatkami wirnika oraz 22 sztuki z regulacją kierownicami wlotowymi. W USA również zaczęto stosować wentylatory osiowe, głównie wytwarzane na licencjach firm europejskich; TLT i KKK (RFN), Nordisk (Dania), Stork (Holandia). Jedynie firma Westinghouse, po 4-letnich przygotowaniach, w 1977 roku oddała pierwsze wentylatory z regulowanymi łopatkami wirnika własnej konstrukcji do prób stanowiskowych. Pomimo tylu zakupionych licencji na wentylatory osiowe, w nowych projektach elektrowni amerykańskich przeważnie stosuje się nadal wentylatory promieniowe (patrz zestawienie).

Zestawienie wentylatorów w elektrowniach węglowych USA [21], [22]

Rok	Średnia moc bloku MW	Paleniska nadciśn. %	Went. powietrza		Went. spalin	
			osiowe	promien.	osiowe	promien.
			szt.		%	
1976	550	6	17 39	27 61	15 32	32 68
1977	500	8	5 14	30 86	6 19	25 81

Szczyt stosowania wentylatorów osiowych w USA przypada na 1976 rok (30-40% ogółu); w 1977 roku stwierdza się regres do niecałych 20%. Jednocześnie obniżyła się średnia wielkość bloku energetycznego z 550 do 500 MW, co wynikło z trudności eksploatacyjnych bardzo dużych bloków. Na 47 omawianych projektów jedynie 4,5% ma moc ponad 800 MW, a 18% ponad 700 MW. Liczba wentylatorów na kocioł wynosi przeważnie 2 (70%), jednak w 30% są po 4 sztuki na kocioł. Widać pewną obawę stosowania bardzo dużych wentylatorów; wyższy koszt inwestycyjny rekompensuje ekonomiczniejsza regulacja i korzystniejszy rozkład czynnika tłoczonego. 10% zastosowanych wentylatorów promieniowych ma regulację zmianą szybkości obrotowej, z tego 1/3 sprzęgłem hydraulicznym. Zastosowano również tyrystorową regulację obrotów silnikiem pierścieniowym, która w porównaniu ze sprzęgłem hydraulicznym przy 50% znamionowej wydajności daje o 50% większą oszczędność energii na napęd. Napęd turbinowy wentylatorów (szczególnie korzystny dla kotłów nadciśnieniowych, gdzie tylko jest wentylator powietrza), wbrew wcześniejszym prognozom nie przyjął się; zastosowano go tylko w jednym projekcie.

Z przytoczonych wyżej danych nasuwa się następujący wniosek:
Z wyjątkiem konserwatywnej Wielkiej Brytanii w połowie lat siedemdziesiątych nastąpił wzrost zainteresowania osiowymi wentylatorami powietrza i spalin, również z regulowanymi podczas pracy łopatkami wirnika. W dalszym ciągu nastąpił pewien regres (na przykładzie Francji i USA), wynikający z trudności eksploatacyjnych tego systemu regulacji. Wentylatory osiowe z przestawnymi podczas ruchu łopatkami wirnika wymagają bowiem bardzo wysokiej kultury eksploatacji oraz niezawodnego i wysokosprawnego odpylania spalin. Personel eksploatacyjny elektrowni, nawykły do obsługi nieskomplikowanych na ogół i stosunkowo odpornych na chwilowy wzrost stężenia zapylenia czynnika wentylatorów promieniowych, trudno jest przyzwyczaić do granicznie wytężonych, a jednocześnie precyzyjnych (hydrauliczny mechanizm przestawczy!) wentylatorów osiowych. Początkowe trudności eksploatacyjne z mechanicznym systemem przestawiania łopatek wirnika podczas ruchu znane były również w Polsce.

Wydaje się, że w początkowym okresie wdrażania osiowych wentylatorów kotłowych, bardziej celowe, ze względu na prostotę obsługi i większą odporność na zapylenie, jest stosowanie wentylatorów akcyjnych z nieruchomymi łopatkami wirnika, regulowanymi za pomocą kierownic wlotowych. Akcyjne wentylatory powietrza, dla uzyskania stabilnej charakterystyki przepływowej, wyposaża się w tzw. separator, opatentowany w ZSRR. Licencje na jego stosowanie zakupili wytwórcy wentylatorów w NRD i RFN [6]. Krajowe badania nad separatorem do wentylatorów typoszeregu WOD wypadły pomyślnie [16] w związku z tym przemysł krajowy może również zaoferować akcyjne wentylatory powietrza z separatorem. Zastosowanie ich jako wentylatory spalin wymaga uprzedniego wykonania badań eksploatacyjnych dla czynnika zapylonego. Tymczasem więc, stosuje się akcyjne wentylatory spalin bez separatora, wymagające pewnej ostrożności przy pracy równoległej.

Reasumując akcyjne wentylatory osiowe mają wprawdzie mniej korzystną charakterystykę regulacyjną od wentylatorów z regulowanymi łopatkami wirnika podczas pracy, jednak łatwość napraw, większa odporność na czynnik zapylony przemawia za ich stosowaniem na obecnym etapie rozwoju energetyki krajowej.

2. Projektowanie wirników granicznie wytężonych

Podawane w podręcznikach wentylatorowych [1], [3], [10], [18] metody wytrzymałościowych obliczeń kół wirnikowych charakteryzują się dużym stopniem uproszczenia, w związku z czym wyniki są przybliżone [7]. Wzrost parametrów, przede wszystkim mocy jednostkowych (do 6 MW) i prędkości obwodowych (ponad 150 m/s), spowodował, że wentylatory stały się maszynami granicznie wytężonymi, do budowy których trzeba stosować wysokowytrzymałe tworzywa. Konieczne jest także uściślenie metod obliczeniowych, wyniki których weryfikuje się doświadczalnie, np. tensometrycznie.

Komputeryzacja obliczeń, ze względu na szybkość działań, umożliwia zastosowanie nowych metod obliczeniowych. Do takich metod należą: metoda różnic skończonych oraz metoda elementów skończonych [20], pozwalająca na obliczenie trójwymiarowego stanu naprężeń. Metodą tą, opracowaną dla techniki lotów kosmicznych, oblicza się m.in. konstrukcje budowlane [19]. W ZSRR zastosowano ją już z powodzeniem do obliczania łopatek wentylatorów promieniowych [12], obliczając jednak tarcze całkowaniem numerycznym. Ponadto opublikowano program obliczania dowolnych tarcz osiowo-symetrycznych metodą "siatkową" [15] oraz łopatek wentylatora promieniowego metodą operatorową [5]. W kraju także pracuje się nad metodami obliczeń wytrzymałościowych [8], [9].

3. Dynamika pracy dużych maszyn

Wentylatory, podobnie jak inne maszyny, mają określony dopuszczalny poziom drgań elementów [24], powyżej którego ich praca może się stać dokuczliwa a nawet niebezpieczna dla otoczenia. Zagadnienie to nie stanowiło problemu nawet dla średnio wytężonych wentylatorów. O spokojnej pracy na ogół decydowało właściwe wyrównoważenie wentylatora.

Inaczej w wentylatorach wytężonych granicznie zarówno pod względem wytrzymałościowym, jak i termicznym. Mimo właściwego wyrównoważenia wentylator może mieć skłonność do drgań wskutek niewłaściwych rozwiązań konstrukcyjnych lub technologicznych. Do projektowania granicznie wytężonych wentylatorów konieczny jest sposób podejścia podobny jak dla turbin. Każdy element, każde połączenie powinny być przemyślane i zaprojektowane tak, by zapewnić jednoznaczność położenia w czasie rozruchu, pracy czy przy za-

trzymaniu. Niewłaściwa technologia (np. spawania) może być powodem odkształceń, a następnie utraty wyrównoważenia wirnika. Badania wykazały [4], że pospawalnicze naprężenia wewnętrzne w tarczy wirnika mogą osiągnąć wartość równą granicy plastyczności. Wirnik taki może się oczywiście podczas pracy odkształcić.

Odkształcenia sprężyste tarczy wirnikowej pracującej przy prędkości obrotowej 170 m/s. są rzędu dziesiętnych milimetra; niewłaściwe połączenie takiej tarczy z wałem może spowodować przemieszczenie osi wirnika, utratę współosiowości z wałem i wyrównoważenia.

Mała sztywność podpór łożyskowych powoduje obniżenie rezonansowej prędkości obrotowej wału, w skrajnym przypadku do prędkości roboczej.

Dobór wału z zapasem 20% w stosunku do obrotów rezonansowych, wystarczający dla mniejszych wentylatorów, jest tu nie do przyjęcia. Nawet 35% zapasu może okazać się za mało. W pewnych przypadkach wirnik można ukształtować jako pudło rezonansowe o częstotliwości rezonansowej zbliżonej do roboczej. Pomimo dobrego wyrównoważenia i właściwego zapasu do obliczeniowych obrotów rezonansowych wału, układ będzie miał skłonność do drgań i często pracował niespokojnie. Dlatego zaczyna się stosować doświadczalne wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych modeli całego zespołu wirującego na stołach wibracyjnych.

Istotnym zagadnieniem są odkształcenia termiczne, zdarzające się w wentylatorach tłoczących czynniki o wysokich temperaturach, szybkozmiennych, często zatrzymywanych i uruchamianych. Wentylatory pracujące dobrze w niskich temperaturach (<400 K), nierzadko pracują źle, tłocząc gorące czynniki o temperaturach powyżej 600 K. Szczególnie ostrożnie należy wtedy rozważać możliwość stosowania wałów rurowych.

Dla dużych wentylatorów istotna jest także konfiguracja przewodów, między które wentylator jest wbudowany. W niekorzystnym przypadku może ona stworzyć rezonator, sprzyjający drganiom układu wentylator-przewody.

Podsumowując powyższe rozważania, dla zapewnienia spokojnej i bezpiecznej pracy wysoko wytężonego wentylatora, należy spełnić następujące wymagania:

a) dobre i pewne fundamentowanie,
b) wystarczająco sztywne podpory łożyskowe,
c) połączenie wirnika z wałem zapewniające współosiowość przy zmiennych prędkościach obrotowych i temperaturach,
d) rzeczywista odległość częstotliwości roboczej od rezonansowej wału oraz wirnika powinna wynosić co najmniej 15%, a obliczeniowa 40%,
e) technologia zespołu wirującego powinna zapewniać niezmienność wymiarów wirnika w czasie, aby wyzwalanie się naprężeń wewnętrznych nie powodowało odkształcania wirnika i przemieszczania środka masy,
f) konstrukcja wirnika powinna być niewrażliwa na zmiany termiczne,
g) koło wirnikowe powinno być maksymalnie odporne na ścieranie pyłem zawartym w tłoczonym czynniku. Szczególnie nie zaleca się stosowania ło-

patek profilowanych z pustym wnętrzem, do którego może dostawać się pył, powodować utratę wyrównoważenia, a w skrajnym przypadku zniszczenie wirnika.

W celu zapobiegania ciężkim awariom wprowadza się urządzenia nadzorujące pracę dużych wentylatorów [13]. Wielkościami mierzonymi, ewentualnie rejestrowanymi, są drgania (łożysk) oraz przemieszczenia wału, sygnalizujące uszkodzenie łożyska. Koszt urządzenia monitorującego te wielkości dla 4 wentylatorów wynosił w 1977 roku ok. 9000 dolarów; wydatek ten rekompensowany jest wcześniejszą sygnalizacją niesprawności oraz minimalizacją kosztów napraw.

Uniezależnienie się od wpływu wysokich temperatur przy zatrzymywaniach i rozruchach daje zastosowanie obracarek wirnika, wprowadzanych dla dużych wentylatorów [2]. Dzięki nim unika się odkształceń termicznych wałów, a ponowny rozruch przebiega łatwiej i bez drgań. Obracarki wyposażone są w sprzęgła odłączające; moc silników wynosi ok. 35 kW przy rozruchu ze stanu zatrzymanego, a tylko 8 kW przy podjęciu obracania z wybiegu wirnika.

4. Wnioski końcowe

1. Dla dużych bloków energetycznych kotłowe wentylatory osiowe rozpowszechniają się powoli.
2. W celu zwiększenia dokładności obliczeń wprowadza się nowe komputerowe metody obliczeń wytrzymałościowych wirników o dokładności ok. 3%.
3. Szczególnego znaczenia nabierają dla dużych wentylatorow zjawiska drganiowe, wymagające specjalnych metod projektowania, zabudowy i eksploatacji wentylatorów.

LITERATURA

[1] Back O.: Ventilatoren. VEB W.Knapp. Halle 1955.

[2] Bussel J.G., Collins T.J.: Turning gear design for hot-gas fan. Power Engineering. 1977. Nr 5, S. 56-58.

[3] Eck B.: Ventilatoren. Springer Verlag. 1972.

[4] Ginalski J., Roliński Z., Skibiński T.: Badania naprężeń własnych w elementach cienkościennych. Przegląd Mechaniczny. 1978. Nr 9, s.5-9.

[5] Gorłyszkin W.T., Morpiczuk I.F.: Rasczot profilirowanych trechsłojnych łopatok centrobieżnych wentilatorow. Probl.Procznostu.1974.Nr 12, z.77-80,

[6] Henssler H.: Neue Exialventilatoren ohne instabilen Betriebsbereich. VGB-Kraftwerktechnik. 1977. Nr 3, s. 159-165.

[7] Kopczyński R.: Ocena wartości obliczeń wytrzymałościowych wirnika went. prom. wykonanych met. uproszcz. Biul.Branż. "Klimawent" 1978. Nr 2.

[8] Kosman G.: Metody wytrzymałościowych obliczeń wirników wentylatorów promieniowych. Zesz.Nauk. Pol.Śl. Energetyka 1971. Z. 40, s. 80-100.

[9] Kosman G., Wajsprych A.: Dobór wybranych cech konstrukcyjnych wirników wentylatorów promieniowych. Z.N. Pol. Śl. Energetyka z. 56, s.43-57.

[10] Lewin I.M., Bołkaczik I.A.: Dymososy i wentilatory moszcznych elektrostancji. Gosenergoizdat. 1962.

[11] Łapa J.: Tendencje rozwojowe kotłowych wentylatorów spalin i powietrza. Referat na I Konferencję "Wentylatory przemysł." Wisła 11 1974

[12] Miszlin B.I.: Rasczot staticzeskoj napriażennosti raboczich koles CKM Energomaszinostrojenie. 1978. Nr 3, s. 1-3.

[13] Mitchell J.S.: Monitoring Machinery Health (cykl 4 artykułów).Power. 1977. Nr 3,5,6,8.

[14] Olesen P.: Design and operation of axial flow fans. Combustion. 1977. Nr 7, s. 26-28.

[15] Pak M.: Ein Rechenprogramm zur Festigkeitsberechnung rotationssymetrischer Scheiben beliebeig veränderlicher Dicke mit Hilfe des Gitterrostverfahrens. Konstruktion. 1976. Nr 10, s. 386-390.

[16] Radwański J.: Zastosowanie automatycznego przelicznika charakterystyk wentylatorów w badaniach modelowych wentylatorów przemysłowych. Ref. na Giełdzie Post.Techn. Katowice 1976.

[17] Rogers J.D., Gilkey C.H.: A summary of experiences with fan induced duck vibrations on fossil fueled boilers. Combustion. 1975. Nr 12,s. 29-32.

[18] Sołomachowa T.S.: Centrobieżnyje wentilatory. Maszinostrojenie.1975.

[19] Szmelter J., Dacko M. i inni: Programy metody elementów skończonych. Arkady, Warszawa 1973.

[20] Zienkiewicz O.C.: Metody elementów skończonych. Arkady,Warszawa 1972.

[21] Annual Plant Design Report 1976. Power. 1976. Nr 11. s.2.

[22] Annual Plant Design Report 1977. Power. 1977. Nr 11, s. 2-20.

[23] Bloki 600 MW Le Havre i Porcheville. Nowa Technika w Energ. Zagran. 1972. Nr 1.

[24] VDI-Richtlinie 2056 Beurteilungsmasstäbe für mechanische Schwingungen von Maschinen. 1964.

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ БОЛЬШИХ КОТЕЛЬНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Р е з ю м е

Обсуждены направления развития котельных вентиляторов, новые методы расчёта рабочих колёс и проблемы динамики работы, особенно явления вибрации.

SELECTED PROBLEMS OF LARGE BOILER FANS

S u m m a r y

The paper discusses the trends of development of boiler fans, new fan rotors designing methods and working dynamics od large fans, paying special attention to vibration problems.