

Tadeusz CHMIELNIAK

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Śląska

TURBINA GAZOWA - WAŻNY SILNIK ENERGETYCZNY

Streszczenie. Omówiono główne cechy współczesnej turbiny gazowej. Wskazano na techniczne uwarunkowania jej dalszego rozwoju. Podano dziedziny jej obecnego i przyszłościowego zastosowania.

GAS TURBINE - IMPORTANT THERMAL ENGINE

Summary. Main features of the contemporary gas turbines has been presented. The technical conditions of the further gas turbines development has indicated. At last the main gas turbines application fields has shown.

1. Wprowadzenie

Pierwszą stacjonarną instalację turbiny gazowej uruchomiono w Neuchatel (Szwajcaria) w 1939 r. (moc instalacji - 4 MW). Od tego momentu następował rozwój konstrukcji głównych maszyn i urządzeń obiegu, rozszerzenie struktur technologicznych oraz zakresu zastosowań instalacji z wykorzystaniem turbiny gazowej. Rozwój ten uzasadniają liczne zalety turbiny gazowej, z których najważniejsze to:

- niezawodność działania (> 99 %),
- duża elastyczność cieplna (instalację turbiny gazowej można doprowadzić do pełnego obciążenia, w stosunkowo krótkim okresie: $\Delta t = 3 - 10(20)$ min),
- znaczna żywotność (przy prawidłowej eksploatacji); do 200 tys. godzin,

- lekkość i zwartość budowy (instalacje tego typu odznaczają się ponad dwukrotnie mniejszym, w porównaniu z siłowniami parowymi, współczynnikiem charakteryzującym stosunek powierzchni do zainstalowanej na niej mocy; jest on zazwyczaj mniejszy od $0.1 \text{ m}^2/\text{kW}$),
- niewielkie zużycie wody,
- korzystne charakterystyki ekologiczne i ekonomiczne,
- łatwość obsługi i automatyzacji procesów eksploatacyjnych,
- możliwość pracy w różnych układach technologicznych, a także z różnym czynnikiem roboczym.

Istotną przesłanką przyspieszającą współcześnie rozwój i zakres zastosowania turbin gazowych jest dostępność i konkurencyjność paliwa gazowego oraz postęp w inżynierii materiałowej. Nie bez znaczenia jest ciągły postęp w zrozumieniu fizyki procesów i konwersji energii w przepływach i procesie spalania oraz transfer technologii lotniczych i kosmicznych do przemysłu turbin gazowych.

Układy turbin gazowych instaluje się obecnie w energetyce oraz w różnych gałęziach przemysłu i transportu. W układach generacji energii elektrycznej i ciepła od początku lat 90. moc instalowanych turbin gazowych przekracza 25 tys. MW rocznie. Zdecydowanie przeważa przy tym zastosowanie turbin gazowych w układach gazowo-parowych.

Zauważmy, że w tym przypadku uzyskuje się względnie wysoką sprawność konwersji energii chemicznej paliwa, spełniając przy tym obowiązujące normy obciążenia środowiska naturalnego. Połączenie prostych układów turbin gazowych najnowszej generacji z trójprężnym kotłem odzyskowym gwarantuje sprawność wytwarzania energii elektrycznej przekraczającą wartość 55%. Sprawność prostych instalacji turbin gazowych nie jest zbyt wysoka (nie przekracza obecnie zazwyczaj 40%). Z tego powodu ich zastosowanie jako jednostek autonomicznych powinno być ograniczone do układów spełniających specjalne funkcje (układy szczytowe, napęd maszyn roboczych, układy akumulacyjne, transport gazu itd.).

2. Klasyfikacja instalacji turbin gazowych

Można przyjąć wiele kryteriów podziału (klasyfikacji) instalacji turbin gazowych. Z punktu widzenia ogólnej struktury układów dzielimy je na [1]

- a) otwarte,
- b) zamknięte,

- c) częściowo zamknięte,
- d) kombinowane

W układzie otwartym (rys. 1a) medium jest zasysane z otoczenia i po ekspansji w turbinie zostaje skierowane z powrotem do otoczenia. W drugim przypadku czynnik roboczy krąży w układzie (konturze) zamkniętym, rys. 1b. Układ częściowo zamknięty tworzymy przez połączenie układu otwartego i zamkniętego. Część medium jest wymieniana z otoczeniem, część recyrkuluje w układzie zamkniętym, rys. 1c. Układy kombinowane stanowią osobną rozległą grupę instalacji połączonych hierarchicznie, w których układ turbiny gazowej stanowi zazwyczaj nadbudowę zamkniętego układu parowego.

Układy otwarte pracują zazwyczaj z izobarycznym spalaniem wewnętrznym. Charakterystyczne dla tego procesu są zmiana składu chemicznego czynnika roboczego, zmienność strumienia substancji oraz często duży współczynnik nadmiaru powietrza. Dla uniknięcia korozji i erozji części przepływowej turbiny stawiane są odpowiednie wymagania jakościowe w stosunku do paliw. W instalacjach zamkniętych zazwyczaj jednorodne medium podgrzewa się w górnym źródle (reaktor jądrowy, kocioł pyłowy itd.) i oddaje ciepło w dolnym źródle (chłodnica wstępna). W ten sposób są mniej wrażliwe na jakość utylizowanego paliwa. Minimalne ciśnienie w konturze może w tym przypadku znacznie przekraczać ciśnienie otoczenia.

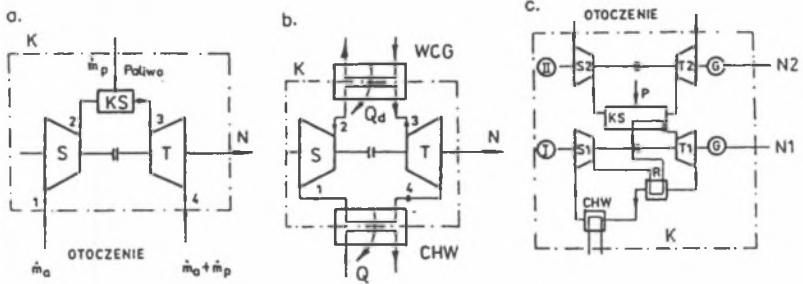
Inną podstawą klasyfikacji układów turbin gazowych jest zakres karnotyzacji obiegów standardowych (układy otwarte) i porównawczych (układy zamknięte).

Wyróżniamy:

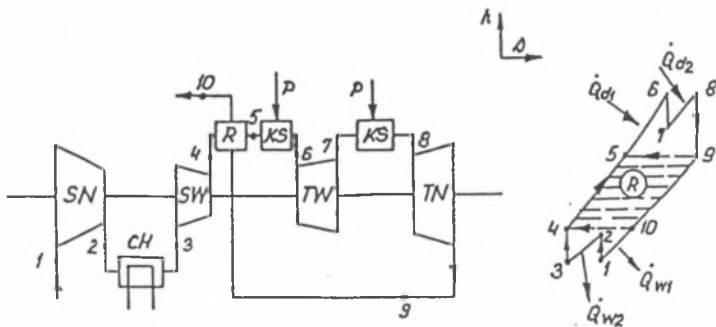
- a) układy proste (bez regeneracji z jedną komorą spalania oraz jednomodułowym procesem sprężania), rys. 1a.
- b) układy złożone (z regeneracją, z wieloma komorami spalania, z chłodzeniem międzymodułowym sprężarek), rys. 2.

Rozbudowanym instalacjom technologicznym odpowiadają złożone układy konstrukcyjne: instalacje dwuwałowe i trójwałowe, rys. 3.

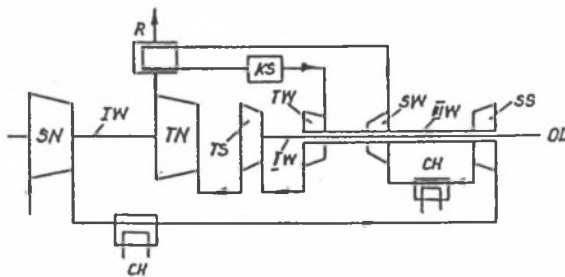
Można wyróżnić dwie podstawowe postacie konstrukcyjne turbin gazowych: stacjonarne (heavy industrial) i lotniczopochodne. Niektóre konstrukcje zawierają elementy jednej i drugiej konstrukcji (konstrukcje hybrydowe). Pierwsze z nich charakteryzują się (dotyczy to zarówno węzłów konstrukcji sprężarek, jak i turbin) większym ciężarem i zbliżoną konstrukcją niektórych elementów do turbin parowych (np. ciężar, kadłuby dzielone w płaszczyźnie poziomej).



Rys. 1. a. Układ otwarty turbiny gazowej, b. Układ zamknięty, c. Układ częściowo zamknięty
 Fig.1. a. Open gas turbine cycle, b. Closed gas turbine cycle, c. Semi closed gas turbine cycle



Rys. 2. Złożony układ turbiny gazowej z regeneracją
 Fig.2. Regenerative gas turbine cycle



Rys. 3. Złożony układ turbiny gazowej wielowalowej
 Fig.3. Multi-schaft gas turbine installation

Dla tych samych mocy turbiny te posiadają większe wymiary, mniejszą prędkość kątową i większy strumień powietrza oraz inny sposób łożyskowania. Stosunek ciężaru do mocy jest dla tych jednostek większy niż dla turbin lotniczopochodnych, wymagają one także więcej powierzchni dla montażu i prowadzenia eksploatacji.

Stosunki ciśnień i ekspansji są w turbinach typu stacjonarnego zazwyczaj niższe niż dla jednostek lotniczopochodnych, podobnie jest także gdy rozpatrywać maksymalne temperatury w instalacjach. Przykładem konstrukcji stacjonarnej może być turbina GT 8 (ABB Zamech Ltd).

Instalacje lotniczopochodne oparte są w swej konstrukcji na silnikach lotniczych. Ich ważną cechą jest modułowa budowa ułatwiająca montaż oraz naprawę uszkodzonych węzłów i elementów.

Znanym przykładem turbiny lotniczopochodnej jest turbina Trent N = 52,55 MW wywodząca się od silnika Rolls Royce RB211.

Konstrukcje hybrydowe (charakterystyczne zwłaszcza dla mniejszych jednostek) łączące cechy jednej i drugiej konstrukcji mają zazwyczaj konstrukcję zbliżoną do lotniczopochodnych (np. konstrukcja turbiny MARS firmy Solar).

Lekkie wirniki turbin lotniczopochodnych posadowione są w łożyskach tocnych (kulkowych lub rolkowych), natomiast w turbinach typu stacjonarnego i hybrydowego stosowane są łożyska ślizgowe promieniowe i oporowe. Różnice w łożyskowaniu prowadzą do innych układów oleju smarowego. W instalacjach turbin lotniczopochodnych stosuje się wyłącznie olej syntetyczny. W instalacjach jednowałowych zespołów turbin gazowych można wyróżnić układy z napędem generatora po stronie sprężarki, a także po stronie turbiny. W tym ostatnim przypadku wymagana jest specjalna konstrukcja obudowy łożysk i sprzęgła. W układach wielowałowych często spotykanym rozwiązaniem jest wyodrębnienie turbiny napędzającej tylko generator, sprzężonej przepływowo z poprzednią częścią turbiny lub wyposażonej w drugą komorę spalania. W dodatkową komorę spalania może być także wyposażona instalacja jednowałowa (np. turbiny GT24 i GT26 z tzw. sekwencyjnym spalaniem).

Prędkość kątowa poszczególnych węzłów stosowanych współcześnie zespołów turbin gazowych jest bardzo zróżnicowana (dla małych jednostek może osiągać wartość $25 \cdot 10^3$ obr/min). W układach wielowałowych jest ona na ogół zróżnicowana dla poszczególnych wałów. Turbiny wykorzystywane w energetyce do napędu generatorów elektrycznych w przypadku prędkości kątowej różnej od 50 s^{-1} (60 s^{-1}) (lub 25 s^{-1} (30 s^{-1})) wyposażone są w

przekładnie zębate. Są one źródłem dodatkowych strat mechanicznych oraz hałasu. Ich zastosowanie zmniejsza też zazwyczaj niezawodność i dyspozycyjność całego zespołu.

Turbiny są przeważnie typu osiowego o wysoko obciążonych stopniach. Stopień ekspansji w pojedynczych stopniach waha się między 2 i 3 (choć możliwe są stosunki ekspansji rzędu 4,5, dalszy wzrost obciążenia jest ograniczony kątem rozwarcia przekroju merydionalnego oraz niską sprawnością charakterystyczną dla większych wartości stopnia ekspansji). W mniejszych zespołach napędowych (w transporcie i lotnictwie) mogą występować turbiny promieniowe.

3. Podstawowe charakterystyki instalacji turbin gazowych

Ważnymi charakterystykami turbin gazowych są funkcje:

$$\eta_t = f(l_{TG}, \zeta, \varepsilon_s, \sigma, \omega, \eta_T, \eta_s, \chi) \quad (1)$$

$$\psi = \frac{N_T - N_s}{N_T} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{T_4}{T_1} = f(\varepsilon_s, \sigma, \zeta, \omega, \eta_T, \eta_s, \chi) \quad (3)$$

gdzie: η_t - sprawność energetyczna układu; η_T, η_s - sprawność politropowa (lub izentropowa) procesów ekspansji w turbinie i sprężana w sprężarce; ε_s - stosunek sprężu; σ - miara strat hydraulicznych w układzie; $\zeta = T_3/T_1$; $\omega = T_1/T_0$; T_1, T_3, T_4, T_0 - temperatura bezwzględna odpowiednio: przed sprężarką, przed turbiną gazową, za turbiną gazową, odniesienia; χ - stosunek ciepł właściwych przy stałym ciśnieniu i objętości; l_{TG} - praca właściwa układu.

Charakterystyka (1) jest związkiem między sprawnością energetyczną η_t a pracą jednostkową l_{TG} i głównymi wielkościami charakterystycznymi obiegu (ζ, ε_s , przykład tej charakterystyki dla układu prostego przedstawia rys. 4). Zależność (2) wskazuje na udział mocy efektywnej w mocy turbiny gazowej, natomiast zależność (3) mówi nam o wartości temperatury wylotowej spalin. Ta charakterystyka ma duże znaczenie przy budowie układów kombinowa-

nych z turbiną gazową. Określa bowiem poziom możliwej do osiągnięcia temperatury pary w zainstalowanym za turbiną gazową kotle odzyskowym. Wprowadzenie do charakterystyk (1 - 3) parametru ω umożliwi śledzenie wpływu temperatury przed sprężarką (otoczenia) na efektywność instalacji.

Głównymi wielkościami decydującymi o efektywności energetycznej zespołu turbiny gazowej są stosunek sprężu i temperatura przed pierwszym stopniem turbiny gazowej (ζ). Zależność η_t od ζ jest monotoniczna, natomiast badając przebieg (1) z ε_s można wyodrębnić dwa maksima, jedno dotyczące η_t , drugie l_{TG} .

Istnieją więc dwie optymalne wartości ε_s , jedna gwarantująca uzyskanie dla danej ζ maksymalnej wartości η_t , druga odpowiadająca maksymalnej l_{TG} . Odpowiednie relacje są następujące:

$$\varepsilon_s^{(\eta_t \rightarrow \max)} = \left[\frac{R_T(1+\beta)\zeta\eta_T\eta_S}{R_S\sigma^{\mu_T}(1-\eta_t^{(opt)})} \right]^{\frac{1}{\mu_T+\mu_S}} \quad (4)$$

$$\varepsilon_s^{(l_{TG} \rightarrow \max)} = \left[\frac{R_T}{R_S} \eta_T \eta_S \zeta (1+\beta) / \sigma^{\mu_T} \right]^{\frac{1}{\mu_T+\mu_S}} \quad (5)$$

$$\varepsilon_s^{(\eta_t)} = \varepsilon_s^{(l_{TG})} (1 - \eta_t^{(opt)})^{\frac{1}{\mu_T+\mu_S}} \quad (6)$$

przy czym: R_T, R_S - odpowiednio indywidualne stałe gazowe dla czynnika sprężanego i spalin w turbinie; $\mu_T = \left(\frac{R}{c_p} \right)_T \eta_T$; $\mu_S = \left(\frac{R}{c_p} \right)_S \frac{1}{\eta_S}$; η_T, η_S - sprawności politropowe, $\beta =$ stosunek strumieni masy paliwa do powietrza na wlocie do komory spalania.

Na podstawie (6) widać, że $\varepsilon_s^{(\eta_t)}$ jest zawsze większy od $\varepsilon_s^{(l_{TG})}$. Różnica tych wielkości zwiększa się ze wzrostem sprawności.

Stosunek γ jest równy

$$\gamma = \zeta (\sigma \varepsilon_s)^{-\mu_T} \quad (7)$$

Dla $\varepsilon_s^{(\tau_G)}$ jego wartość wynosi

$$\gamma = \zeta^{\frac{\mu_s}{\mu_T + \mu_s}} \quad (8)$$

zaś dla $\varepsilon_s^{(\eta)}$

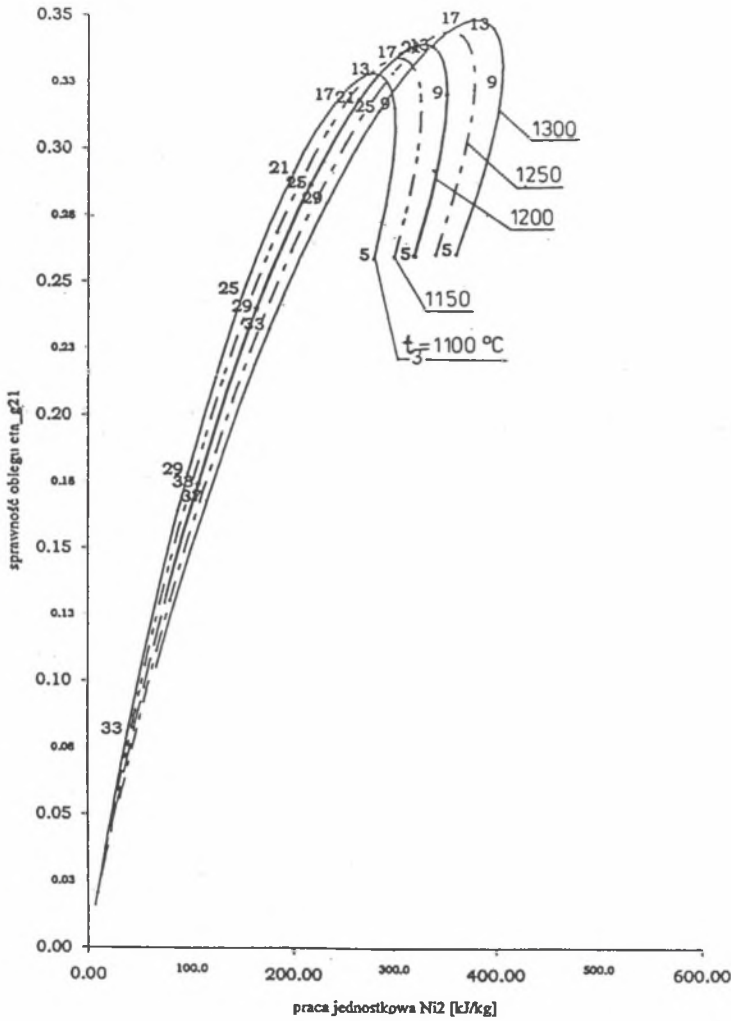
$$\gamma = \zeta^{\frac{\mu_s}{\mu_T + \mu_s}} \left(1 - \eta_t^{(\text{opt})}\right)^{\frac{\mu_T}{\mu_T + \mu_s}} \quad (9)$$

Porównanie (8) i (9) wskazuje, że dla tych samych wartości ζ temperatura wylotowa spalin będzie zawsze większa dla układu turbiny gazowej pracującej z mocą maksymalną. Im większa jest przy tym $\eta_t^{(\text{opt})}$, tym większa jest różnica temperatur spalin wylotowych w układach pracujących z $\tau_G = \max$ i $\eta_t = \max$. Fakt ten ma duże znaczenie w budowie hierarchicznych układów gazowo-parowych.

Analiza układów złożonych pozwala także znaleźć warunki, przy których uzyskujemy maksymalne sprawności i pracę jednostkową. Sposób postępowania jest podobny, choć w układach złożonych pojawiają się zazwyczaj dodatkowe równania więzów

4. Kierunki i uwarunkowania rozwoju

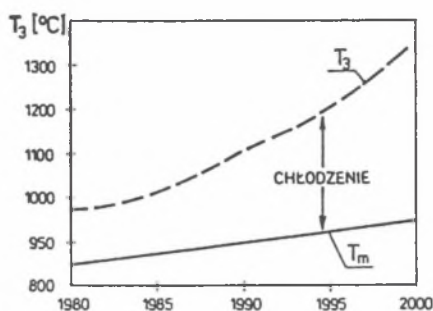
Wzrost temperatury przed turbiną oraz związany z tym wzrost sprawności i pracy jednostkowej są ważnymi miarami rozwoju układów turbin gazowych. Na podstawie oceny charakterystyk produkowanych turbin można zauważyć ciągłą tendencję wzrostu temperatury przed turbiną (rys. 5), jest ona intensywniejsza niż możliwy wzrost (wskutek opracowywania nowych tworzyw metalicznych) średniej temperatury łopatek i innych węzłów turbiny. Różnica między T_3 i T_m może być pokonana przez zastosowanie chłodzenia. Wprowadzane nowe materiały, technologie odlewania łopatek (ukierunkowana krystalizacja, konstrukcje monokryształiczne), powłoki ochronne (przed korozją i utlenianiem) umożliwiają zwiększenie nie tylko dopuszczalnej temperatury metalu, ale także trwałości pełzaniowej i małowyczkowej elementów układu przepływowego.



Rys. 4. Przykładowa charakterystyka $\eta_i = f(l_{TG})$ (obliczenia zostały wykonane dla stosunków niskich sprawności politropowych turbiny i sprężarek i z uwzględnieniem strat hydraulicznych)

Fig.4. Example of the gas turbine characteristics $\eta_i = f(l_{TG})$

Drugim zauważalnym kierunkiem postępowania jest wprowadzenie materiałów ceramicznych (obecnie głównie dla małych zespołów), co istotnie zwiększa temperaturową odporność układu przepływowego (podnosi dopuszczalną temperaturę T_m).



Rys. 5. Zmienność temperatury T_3 i metalu T_m z biegiem czasu
 Fig. 5. Variability of the temperature T_3 and metal temperature T_m with time

Ogólnie rzecz biorąc, główne prace nad rozwojem turbin gazowych koncentrują się wokół zagadnień:

- zwiększania temperatury przed turbiną gazową,
- nowych technologii chłodzenia poszczególnych węzłów turbiny gazowej (nowe mechanizmy przekazywania ciepła, zmniejszenie strat hydraulicznych w układzie chłodzenia, nowe czynniki chłodzące, zmniejszenie ilości czynników chłodzących),
- zwiększenia mocy zespołu turbiny gazowej (wzrost strumienia masy przez sprężarkę i turbinę, wzrost obciążenia aerodynamicznego stopni turbinowych i sprężarkowych),
- wydłużenia żywotności i wzrostu niezawodności najbardziej obciążonych węzłów i elementów instalacji,
- wprowadzenia nowych struktur technologicznych (chłodzenie międzymodułowe, sekwencyjne spalanie, układy wielowalowe, regeneracja, spalanie gazów syntetycznych i innych paliw średnio- i niskokalorycznych, regeneracja, spalanie zewnętrzne i wymienniki wysokotemperaturowe, regeneracja chemiczna, nowe czynniki robocze itd.).

Największe moce autonomicznych zespołów turbin gazowych są rzędu 250 - 300 MW. Fakt ten w połączeniu z charakterystyczną dla tych mocy wartością pracy jednostkowej $l = 0.375 - 0.615$ (0.75) MW/kg/s prowadzi do strumienia masy przez sprężarkę rzędu 550 - 650 kg/s dla największych jednostek. Dalszy wzrost mocy jest dużym wyzwaniem dla konstruktorów sprężarek i turbin. Zadanie to można rozwiązać wprowadzając do procesu projektowego zaawansowane kody obliczeniowe aerodynamiki i wymiany ciepła.

5. Turbiny gazowe w technologiach przemysłowych

Turbiny gazowe znajdują zastosowanie głównie w instalacjach energetycznych. Turbiny mniejszej mocy są także wykorzystywane jako źródło napędu dla maszyn roboczych głównie sprzężarek i śrub okrętowych. Znajdują także zastosowanie jako silniki w transporcie (transport kolejowy, samochodowy).

W instalacjach produkcji energii elektrycznej i ciepła są silnikami w

- klasycznych i nieklasycznych układach gazowo-parowych (CHAT, układ Kaliny itd.),
- kombinowanych układach gazowo-parowych utylizujących gaz ziemny i węgiel (klasyczny blok węglowy z gazową turbiną czołową, układy sprzężone równolegle),
- układach gazowo-parowych zintegrowanych z tlenowym lub powietrznym zgazowaniem węgla,
- układach z ciśnieniowymi kotłami fluidalnymi (ze złożem stałym i cyrkulacyjnym),
- w innych technologiach węglowych (bezpośrednie, ciśnieniowe spalanie węgla w instalacji turbiny gazowej, zamknięte układy turbin gazowych ze spalaniem zewnętrznym, ciśnieniowe spalanie w kotle pyłowym, turbiny gazowe w układach z ogniwami paliwowymi).

Wzrasta zainteresowanie zastosowaniem turbiny gazowej w małych i średnich elektrociepłowniach gazowych i elektrociepłowniach gazowo-parowych. Wynikiem jest wiele nowych konstrukcji turbin gazowych małych mocy (≥ 20 kW) pracujących także w złożonych układach (chłodzenie międzykadłubowe, podwójna komora spalania, regeneracja).

6. Uwagi końcowe

Układy turbin gazowych są w ciągłym rozwoju. Wzrost mocy jednostkowej, sprawności energetycznej, zmniejszenie emisji zanieczyszczeń, zwiększenie elastyczności paliwowej są przedmiotem głównego zainteresowania rynku energetycznego. Fakt ten oraz dyktowana walką konkurencyjną obniżka cen, a także mnogość struktur technologicznych są istotnymi przesłankami coraz większego rozpowszechniania w przyszłości instalacji energetycznych z turbinami gazowymi [2-8].

LITERATURA

1. Chmielniak T.J., Rusin A., Czwiertnia K.: Turbiny gazowe, w druku.
2. Bannister R.L. i inni: Development requirements for an advanced gas turbine system. ASME Paper 94-GT-388, 1994.
3. Briesch M.S. i inni: A Combined cycle designed to achieve greater than 60 percent efficiency. Trans.of ASME J.of Eng.for Gas Turbine and Power, Vol 117, October, 1995.
4. Diakunchak I.S. i inni: Technology development programs for advanced turbine systems engine. ASME Paper 96-GT-5, 1996.
5. Nomoto H. i inni: The advanced cooling technology for the 1500°C class gas turbines - the steam cooled vanes and the air cooled blades. ASME Paper 96-GT-16, 1996.
6. Touchton G.: Gas turbines: Leading technology for competitive markets. Global Gas Turbines News IGT Vol 36, No 1, 1996.
7. Chmielniak T.J.: Analiza porównawcza instalacji małych elektrociepłowni gazowych z silnikami tłokowymi i turbinami gazowymi. Materiały I Krajowej Konf. Gasterm'99, Międzyzdroje 24-26.05.1999.
8. Chmielniak T.J.: Nowe technologie energetyczne. Opracowanie wewnętrzne Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Władysław Gajewski

Abstract

Main features of the contemporary gas turbines has been presented. An analysis of the different characteristics of the gas turbine installations has been given. The different optimal compression ratios was considered. The development requirements for an advanced gas turbines were discussed. At last the main gas turbines application fields has shown.