ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLASKIEJ

Seria: ENERGETYKA z. 63

Nr kol. 534

Tedeusz CHMIELNIAK Gerard KOSMAN

CIEPLNE WARUNKI PRACY KADŁUBÓW PRZY CZEŚCIOWYM OBCIĄŻENIU TURBINY

> <u>Streszczenie</u>. Określono cieplne warunki pracy kadłubów przy częściowym obciążeniu turbiny. Podano analizę i porównanie współczynników wnikania ciepła dla kadłubów przy zmianie strumienia masy pary. Wyznaczono pola temperatur i naprężeń w kadłubie.

# 1. Wstep

W czasie eksploatacji turbiny jej moc może się zmieniać w szerokim zakresie. Zmianę mocy uzyskuje się zasadniczo przez zmianę strumienia masy czynnika roboczego. Na rys. 1 podano przykładowo zależność mocy od strumienia pary na wejściu do turbiny kondensacyjnej.



Rys. 1. Zależność mocy turbiny od strumienia masy pary

Zmiana strumienia masy wywołuje zmianę rozkładu parametrów pary (ciśnienia i temperatury) w układzie przepływowym turbiny. Zmieniają się prędkości przepływu pary oraz warunki wymiany ciepła. W związku z tym przy częściowym obciążeniu turbiny zmieniają się cieplne i wytrzymałościowe warunki pracy jej elementów.

W niniejszym artykule rozpatrywano ten problem w odniesieniu do kadłubów turbin. Przeanalizowano współczynniki wni-

kania ciepłe oraz temperatury i naprężenia w kadłubie wewnętrznym dla różnych strumieni masy pary przepływającej przez turbinę. Badano kadłub części wysokoprężnej. Zakres zmian temperatury pary za poszczególnymi stopniami przy różnym obciążeniu trubiny podano w tablicy 1. Z uwagi na brak możliwości wykorzystania danych pomiarowych dotyczących rezkładu parametrów pary w układzie przepływowym, temperaturę i ciśnienie pary wyznaczono na drodze obliczeniowej w oparciu o metody zaproponowane w pracy [1].

Tablica 1

Nr stopnia m/m <sub>o</sub>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
`1,0	502	487	473	458	443	427	411	395	378
0,8	493	481	472	460	448	436	420	409	398
0,6	484	474	468	456	444	435	426	416	406
0,4	472	463	458	451	441	435	426	420	412

Temperatura pary za poszczególnymi stopniami przy różnym obciążeniu turibny

# 2. Współczynniki wnikania ciepła przy częściowym obciażeniu turibny

Zredukowane współczynniki wnikania w części przepływowej określono, uwzględniejąc dla każdego stopnia współczynniki podane na rys. 2. Współczyn-



Rys. 2. Współczynniki wnikania ciepła do kadłuba

nik of 2 w kierowniczym kanale międzyżopatkowym wyznaczono, korzystając z formuły [2, 3, 4]

Cieplne warunki pracy kadžubów ...

$$\alpha_2 = 0,032 \frac{\lambda_c}{b} (1 + 0,7 \text{ sg}^{-0,54}) \text{ Re}_2^{0,8}$$
 (1)

$$Sg = \frac{\sin \frac{\beta_1}{2}}{\sin \frac{\beta_2}{2}} \left[ \frac{2b}{t \sin(\frac{\beta_1}{2} - \frac{\beta_2}{2}) \cos^2(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2})} - 1 \right]^{1/2}$$

Przykładowe rezultaty obliczeń  $\alpha_2$  dle różnych wartości strumienia masy zawiera rys. 3. Współczynnik  $\alpha_1$  określono, korzystając z formuł opisujących intensywność wymiany ciepła w uszczelnieniach labiryntowych [3], a współczynniki  $\alpha_5$  i  $\alpha_6$  jako odwrotności oporów przewodzenia styków[5] Przy obliczeniach  $\alpha_3$  i  $\alpha_4$  uwzględniono opór przewodzenia szczelin  $\delta_p$  i warstw materiału  $\delta_m$ . Do obliczenia  $\alpha_8$  wybrano związek ważny dla opływu ścianki płaskiej.





Wyznaczony za pomocą  $\alpha_{1}$  zastępczy współczynnik wnikania, uśredniony na szerokości aparatu kierowniczego i wirującego podano na rys. 4. Z przebiegu krzywych wynika stosunkowo równomierny przebieg funkcji  $\alpha_{R} = f(z)$ . Pewne odchylenia od ogólnej tendencji istnieją w stopniu 1 i 2.Jest to następstwem pewnych różnic geometrycznych w budowie stopni przyjętych do analizy. Dla tych stopni występuje maksymalna różnica wartości  $\alpha_{R}$  w rozpatrywanym przedziale zmienności  $\frac{m_{1}}{m_{0}}$ . W następnych stopniach zmiena współczynników wnikania jest mniej intensywna.



Rys. 4. Zastępczy współczynnik wnikania ciepła dla kadłuba

### Cieplne warunki pracy kadkubów ...



Rys. 5. Model przepływu pary w kanale między kadłubami Do obliczeń współczynnika wnika na powierzchni zewnętrznej kadłuba (w kanale między kadłubami) wybrane zależności [6] (rys. 5):

$$x_{\rm R} = y_{\rm h} \frac{f_1 + \frac{f_1'}{R_0^{\rm m}} ({\rm Pr}^{2/3} - 1)}{1 + \frac{2.09}{R_0^{\rm o}, 1} ({\rm Pr}^{2/3} - 1)}$$
(2)

$$\alpha_{\rm g} = \alpha_{\rm h} \frac{1 + \frac{2.09}{\rm Re^{\rm m}}({\rm Pr}^{2/3} - 1)}{1 + 0.1741 \,\bar{\rm R} + \frac{2.09 + 0.05 \,\bar{\rm R}}{\rm Re^{\rm 0.1}}({\rm Pr}^{2/3} - 1)}$$
(3)

$$\varphi_{\rm h} = \frac{\lambda_{\rm p}}{\bar{\rm d}} \frac{0.023 \, {\rm Re}^{0.8} \, {\rm Pr}}{1 + \frac{2.09}{{\rm Re}^{0.1} ({\rm Pr}^{2/3} - 1)}}, \quad \bar{\rm R} = \frac{{\rm R}_{\rm R}}{{\rm R}_{\rm S}}, \quad \bar{\rm d} = 2({\rm R}_{\rm S} - {\rm R}_{\rm R})$$

Prędkość występująca w okraśleniu liczby Re (Re =  $\frac{w}{\sqrt{2}}$ ) dla różnych obciążeń okraślono z równania ciągłości

$$\frac{\mathbf{w}_{i}}{\mathbf{w}_{o}} = \frac{\mathcal{S}_{o}}{\mathcal{S}_{i}} \frac{\mathbf{m}_{i}}{\mathbf{m}_{o}}$$
(4)

# 3. Rozkład temperatury pary w kanale między kadłubami

Temperaturę pary w kanale między kadżubami (rys. 5) można w przybliżeniu jednowymiarowym obliczyć z równania

$$\frac{dT_p}{dz} = \frac{2\pi}{\mathbf{a}_p \mathbf{c}_p} \left[ R_R \mathbf{c}_R (\mathbf{T}_R - \mathbf{T}_p) + R_s \mathbf{c}_s (\mathbf{T}_s - \mathbf{T}_p) \right]$$
(5)

Ze względu na fakt, że w równanie (5) wchodzi temperatura kadżubów, równanie to należy rozwiązać żącznie z równaniami przewodzenia dla kadżuba

wewnętrznego i zewnętrznego. Równania te rozwiązano dla szeregu wartości strumienia pary 💩 przepływającej między kadłubami. Celem tak postawionego eksperymentu cyfrowego było ustalenie zmian temperatury pary T, w kanale między kadłubami i w konsekwencji sformułowanie odpowiedzi na pytanie, przy jakim strumieniu m<sub>p</sub> można uważać temperaturę T<sub>p</sub> za niezmienną wzdłuż drogi przepływu. Wyniki obliczeń wskazują (przykładowe rezultaty dle  $m_n = 9 \frac{kg}{s}$  przedstawie rys. 6), że nawet dle małych wartości th p

378.5.

335°C



Rys. 6. Rozkład temperatury pary w kanale między kadłubami oraz pola tem-peratury w kadłubie wewnętrznym i zewnętrznym

zmiana temperatury T<sub>D</sub>(z) nie przekracza 1÷1,5%. Dlatego też w analizie naprężeń termicznych w kadłubie wewnętrznym oraz w dalszych obliczeniach pól temperatur zakładano  $T_{p}(z) = idem.$ 



Rys. 7. Przebieg średnich temperatur kadkuba dla różnych wartości a/a,

### Cieplne warunki pracy kadłubów ...

# 4. <u>Rozkład temperatury i napreżeń w kadłubie wewnetrznym</u> przy częściewym obciążeniu turbiny

Zakres obliczeń obejnował określenie pól temperatur w kadłubie wewnętrznym przy różnych obciążeniach. Obliczenia szczegółowe wykonano dla  $\hbar/\hbar_0 = 1$ , 0,8, 0,6 i 0,4. Temperatury wyznaczono metodą numeryczną. Wykorzystano algorytmy oraz programy obliczeniowe opracowane w ramach pracy naukowo-badawczej [7]. Odpowiednie rezultaty obliczeń przedstawiono na rys. 7, 8 i 9. Rys. 7 ilustruje przebiegi średnich temperatur wzdłuż osi turbiny dla różnych stosunków  $\hbar/\hbar_0$ . Rozkład temperatur wzdłuż promienia pokazano na rys. 8 i 9. Wybrano dwa przekroje poprzeczne kadłuba: przekrój A-A (rys. 8) i przekrój B-B (rys. 9). Wspomniane rysunki podają porównanie temperatur w przekrojech A-A oraz B-B dla różnych obciążeń turbiny. Przekrój A-A znajduje się w obrębie stopnia drugiego w przekrój B-B dotyczy stopnia siódmego.



Rys. 8. Rozkład temperatury wzdłuż grubości ścianki (przekrój A-A)



Rys. 9. Rozkład temperatury wzdłuż grubości ścianki (przekrój B-B)

Analiza prezentewanych wyników wskazuje na wyraźną tendencję do wyrównywania się temperatur w kadłubie przy zmniejszaniu obciążenia. Decydują o tym przede wszystkim rezkłady temperatury pary (tablica 1) w mniejszym zaś współczynniki wnikania ciepła w układzie przepływowym turbiny.

Wyznaczone rozkłady temperatury w kadłubie były punktem wyjścia do obliczenia składowych stanu naprężenia. Zakres obliczeń obejmował wyznaczenie rozkładów naprężeń w kadłubie dla  $\hbar/m_{\odot} = 1$ , 0,8, 0,6 i 0,4.

W obliczeniach szczegółowych wyznaczono jedynie naprężenie cieplne,wywołane nierównomiernym rezkładem temperatury. Pominięto naprężenia wywołane ciśnieniem pary.

Do obliczeń wykorzystano metody, algorytmy oraz programy opracowane w ramach pracy naukowo-badawczej [8]. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 10-15. Rysunki te podają przebiegi naprężeń promieniowych, osiowych i obwodowych wzdłuż grubości ścianki w przekrejach A-A eraz B-B.



![](_page_9_Figure_0.jpeg)

![](_page_10_Figure_1.jpeg)

## 5. Analiza uzyskanych rezultatów

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń oraz uzyskanych rezultatów można podać następujące wnioski:

1. Względna zmiana współczynników wnikania na wewnętrznej powierzchni kadłuba przy zmiennym obciążeniu w zakresie  $\hbar/\hbar_0 = 0,4-1,0$  nie przekracza 10-12%. Największe zmiany współczynnika  $c_i$  występują na stopniu pierwszym i drugim. W dalszych stopniach zmiana ta jest bardziej łagodna.

2. Zuniejszenie obciążenie prowadzi do wyrównanie się temperatur w cakym przekroju kadłuba wewnętrznego. W przekroju B-B temperatura metalu rośnie wrza ze zuniejszeniem się obciążenia turbiny. Odwrotną tendencję obserwuje się w przekroju A-A. Wymieniene zmiany są spowodowane zmianą warunków brzegowych wymiany ciepła oraz zmianą rozkładu parametrów pary w turbinie.

3. Największe naprężenie występują przy ebciążeniu nominalnym. Praca turbiny przy ustalonym mniejszym obciążeniu wywołuje mniejsze naprężenia.

4. Naprężenia zmniejszają się wraz ze zmniejszeniem obciążenia. Jak wynika z obliczeń orientacyjnych prowadzonych w pracy [8], reguła te niejest spełnione jedynie w przekroju B-B przy obciążeniu  $\hbar/\hbar_0 < 0.4$ . Zmiana warunków brzegowych wymiany ciepła oraz zmiana temperatury jest przy tym obciążeniu taka, że występuje zupełnie odmienny zarówno jakościowo jak i ilościowo stan naprężenia.

5. Głównym czynnikiem decydującym o zmianie stanu cieplno-wytrzymałościowego kadłuba jest temperatura pary. Wpływ zmiany rezkładu temperatury pary w układzie przepływewym na pola temperatur i naprężeń cieplnych w kadłubie jest bardziej istotny niż wpływ zmian współczynników wnikania ciepła.

### LITERATURA

- [1] Samojżowicz G.S., Trojanowski B.N.: Pieremiennyj režim raboty parewych turbin. GEI, Moskwa 1955.
- [2] Bodunew M.N.: Wysokotiempieraturynej echłażdajemyje gazowyje turbiny. Sbernik statiej, Moskwa 1971.
- [3] Chmielniak T. i inni: ZNPS Energetyka, z. 54, 1976.
- [4] Chmielniak T., Kosman G.: Modelowanie intensywności nagrzewania elementów układu przepływowego turbin. Sympozjon "Modelowanie w mechanice", Beskid Śląski, 1977.
- [5] Chmielniak T., Kosman G.: Katalog współczynników wnikania ciepła dla elementów turbin. Praca neukowo-badawcza, Gliwice 1974.
- [6] Jegliński H.: Der wärmeübergeng bei einer erwungenen Strömung in Ringspalten. Energie enwendung T. 22, 9, 1973.

#### Cieplne warunki pracy kadžubów ...

- [7] Chmielniak T., Kosman G.: Nieustalene pola temperatur w kadžubach turbin cieplnych. Praca naukowo-badawcza, 1970.
- [8] Kesman G.: Metoda wyznaczania naprężeń i odkształceń w kadłubach turbin. Praca naukowo-badawcza, 1973.

ТЕПЛОВОЕ УСЛОВИЯ РАБОТЫ КОРПУСОВ ПРИ УМЕНЬШЕННОМ РАСХОДЕ ПАРА ЧЕРЕЗ ТУРЕИНУ

#### Резюме

Работа содержит некоторые результаты исследований условий работы корпусов при уменьшенном расходе пара через турбину. Приводится анализ и сравнение коэффициентов теплоотдачи в характерных зонах теплообмена. Определено температуры и напряжения в корпусах турбин при переменном режиме.

THERMAL CONDITIONS OF WORK BODY AT THE PARTIALLY LOADED TURBINE

## Summary

In the paper the thermal conditions of bedies at work with the partially loaded turbines have been determined. The analysis and coparision of heat penetration coefficients for bodies with thr changing volume of vapour havebeen given. The range of temperatures and stressen in the body has been determined.