ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1977

Seria: ENERGETYKA z. 63 Nr kol. 534

Gerard KOSMAN

WPŁYW CECH KONSTRUKCYJNYCH NA STAN CIEPLNY ELEMENTÓW TURBIN PRZY STAŁYM OBCIĄŻENIU

Streszczenie. W pracy przeprowadzono analizę wpływu materiałowych i geometrycznych cech konstrukcyjnych na pola temperatur w elementach turbin w ustalonych warunkach eksploatacji. Porównano stany cieplne wyznaczone z uwzględnieniem i bez uwzględnienia zależności współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury. Obliczenia przeprowadzono dla różnych postaci konstrukcyjnych i wymiarów elementów turbin.

1. Wstęp

W badaniach stanów cieplnych i wytrzymałościowych turbin parowych wykorzystuje się obecnie różne metody modelowania matematycznego i fizycznego. Badania doświadczalne pól temperatur, naprężeń i odkształceń są bardzo złożone, a w warunkach normalnej eksploatacji znacznie utrudnione. W licznych przypadkach badania te umożliwiają jedynie integralną ocenę wytrzymałości.

Teoretyczna analiza rozważanych zagadnień, mimo że opiera się zwykle na wielu założeniach upraszczających, dotyczących głównie geometrii badanych elementów, umożliwia ocenę wpływu cech konstrukcyjnych elementu na jego stan naprężenia i odkształcenia. Zastosowanie współczesnej techniki obliczeniowej pozwala jednak wyeliminować szereg założeń upraszczających i rozpatrywać modele bardziej zbliżone do obiektu rzeczywistego [1].

Praktyczne wykorzystanie opracowanych modeli, metod i algorytmów obliczeniowych oraz ich wdrożenie do obliczeń projektowych wymaga rozpatrzenia dodatkowo kilku problemów dotyczących przygotowania danych wejściowych do obliczeń oraz ustalenia zakresu eksperymentów numerycznych. Chodzi np. o problem dokładności zadawania warunków brzegowych wymiany ciepła i oceny wpływu tych warunków na stan cieplny i wytrzymałościowy elementów turbin. Innym problemem jest uwzględnienie w obliczeniach zmienności stałych materiałowych z temperaturą.

W celu rozpatrzenia wymienionych zagadnień podjęto pracę naukowo-badawczą na temat "Analiza czynników wpływających na stan cieplny turbin" [2]. Omawiane w niniejszym artykule zagadnienia wpływu materiałowych i geometrycznych cech konstrukcyjnych na ustalone pola temperatur w elementach turbin stanowią fragment tych badań.

2. Sformułowanie analizowanych zagadnień

W ustalonych warunkach pracy turbiny przy stałym obciążeniu rozkład temperatury wzdłuż grubości ścianki dowolnego elementu określa równanie przewodzenia ciepła

$$\frac{d}{dx}\left[\lambda(T)\, H_{\eta}(x)\, H_{\xi}(x)\, \frac{dT}{dx}\right] = 0 \tag{1}$$

zapisane w układzie współrzędnych krzywoliniowych x, η, ξ dobranych odpowiednio do kształtu elementu. Dla prostych form geometrycznych mamy

$$H = H_{\eta} H_{\xi} = (a + x)^{n} \tag{2}$$

gdzie: a - promień wewnętrzny powłoki, n = 1 dla powłoki walcowej, n = 2 dla powłoki kulistej, x - współrzędne wzdłuż grubości ścianki.

Analizując rozwiązanie równania (1) z odpowiednimi warunkami brzegowymi, można ocenić wpływ cech konstrukcyjnych na pole temperatury w elementach turbin w ustalonych warunkach pracy.

W szczególności rozpatrzymy dwa zagadnienia:

a) Wpływ cech materiałowych na pole temperatury w wybranych elementach turbin. Ocena wpływu zmienności współczynnika przewodzenia ciepła wraz z temperaturą na stan cieplny rozpatrywanych elementów. Ocena błędu spowodowanego przyjęciem stałej wartości λ. Ilościową ocenę przeprowadzono na podstawie analizy funkcji

$$\frac{T_o - T}{T} = f(x, \lambda, \frac{h}{a}) \tag{3}$$

gdzie: T_o jest rozwiązaniem równania (1) dla λ = idem.

b) Wpływ cech geometrycznych na pole temperatury w wybranych elementach turbin. Ocena błędu spowodowanego traktowaniem elementów turbin jako grubościennych płyt. W tym przypadku najprościej jest analizować funkcję

$$\frac{T_p - T}{T} = f(x, \lambda, \frac{h}{a}) \tag{4}$$

gdzie: T_p jest rozwiązaniem równania (1) dla n = 0.

Należy dodać, że model grubościennej płyty jest obecnie szeroko stosowany w obliczeniach cieplno-wytrzymałościowych turbin, zwłaszcza zaś przy doborze optymalnych warunków rozruchu [1].

3. Uwzględnienie rzeczywistej zależności współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury

Rozwiązanie $T = T(x)$ równania (1) dla dowolnej funkcji $\lambda(T)$ nie daje się przedstawić w formie jawnej, co znakomicie komplikuje ocenę wpływu współczynnika λ na pole temperatura. Rozwiązanie to dla znanych temperatur na powierzchni elementu

$$\begin{aligned} T &= T_w \quad \text{dla} \quad x = 0 \\ T &= T_z \qquad\quad\;\; x = h \end{aligned} \tag{5}$$

przyjmuje postać

$$\int_0^{\vartheta} \lambda(\vartheta)\,d\vartheta = \int_0^{\Delta T} \lambda(\vartheta)\,d\vartheta \; \frac{\int_0^{\xi} \frac{d\xi}{H}}{\int_0^{1} \frac{d\xi}{H}} \tag{6}$$

gdzie:

$$\vartheta = T - T_w, \qquad \Delta T = T_z - T_w, \qquad \xi = \frac{x}{h}$$

Jeżeli znamy temperaturę na powierzchni wewnętrznej T_w oraz gęstość strumienia ciepła $\dot{q}$ na tej samej powierzchni, to ostatnią zależność można przedstawić następująco

$$\int_0^{\vartheta} \lambda(\vartheta)\,d\vartheta = -\,\dot{q}\,h\,H(0) \int_0^{\xi} \frac{d\xi}{H} \tag{7}$$

Analiza wpływu funkcji $\lambda(\vartheta)$ na stan cieplny elementów w oparciu o formuły (6) i (7) wymaga przeprowadzenia szeregu obliczeń numerycznych dla wybranych materiałów i założonych cech geometrycznych.

W tablicy 1 zebrano przykładowo rezultaty obliczeń pól temperatur w kadłubie turbiny dużej mocy. Kadłub w obrębie stopnia regulacyjnego traktowano jako powłokę walcową oraz kulistą o promieniu wewnętrznym $a=0,7$ m i grubości ścianki $h = 0,08$ m.

Temperatury na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej kadłuba przyjęto odpowiednio równe $T_w = 450^{\circ}C$, $T_z = 300^{\circ}C$. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury przedstawiono na rys. 1.

Dla tak przyjętych danych wyznaczono pole temperatury w kadłubie ze wzoru (6). Uzyskane rezultaty porównano z rozwiązaniem ϑ_o dla stałej wartości λ oraz z rozkładem ϑ_1, wyznaczonym dla liniowej aproksymacji funk-

kcji $\lambda = \lambda(T)$. W ostatnim przypadku obliczenia wykonano dla następujących zależności:

Staliwo L21HMF

$$\lambda = 36,48 - 0,0483\,\vartheta$$

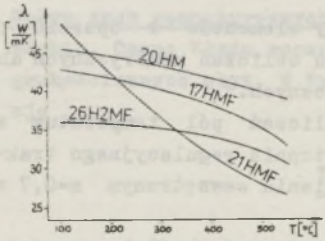
Staliwo L20HM

$$\lambda = 43,33 - 0,0167\,\vartheta$$

Tablica 1

Ustalony rozkład temperatury w kadłubie. Porównanie temperatur ϑ, ϑ_0 i ϑ_1

Model geometryczny		Powłoka kulista				Powłoka walcowa			
Materiał		L21HMF		L20HM		L21HMF		L20HM	
Lp.	r	$\frac{\vartheta_0-\vartheta}{\vartheta}$	$\frac{\vartheta_1-\vartheta}{\vartheta}$	$\frac{\vartheta_0-\vartheta}{\vartheta}$	$\frac{\vartheta_1-\vartheta}{\vartheta}$	$\frac{\vartheta_0-\vartheta}{\vartheta}$	$\frac{\vartheta_1-\vartheta}{\vartheta}$	$\frac{\vartheta_0-\vartheta}{\vartheta}$	$\frac{\vartheta_1-\vartheta}{\vartheta}$
-	m	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0,71	8,82	1,11	3,19	0,21	9,37	4,59	2,68	0,46
2	0,72	7,62	1,42	2,42	0,33	8,84	4,81	2,29	0,52
3	0,43	6,21	1,25	1,91	0,21	7,89	4,18	1,91	0,43
4	0,74	4,93	1,15	1,42	0,13	7,25	3,53	1,59	0,26
5	0,75	3,77	1,02	1,09	0,09	4,40	1,98	1,16	0,17
6	0,76	2,58	0,81	0,74	0,05	2,87	1,68	0,75	0,08
7	0,77	1,32	0,51	0,39	0,03	1,43	0,32	0,37	0,05



Rys. 1

Analiza przedstawionych rezultatów oraz dalszych uzyskanych w pracy [2] wskazuje, że wpływ współczynnika przewodzenia ciepła na pole temperatury jest istotny. Wpływ ten zależy od cech materiałowych elementu a w szczególności od intensywności zmian współczynnika λ z temperaturą. Porównanie temperatur ϑ i ϑ_1 wskazuje na dostateczną dokładność liniowej aproksymacji funkcji (T). Szczególnie małe rozbieżności uzyskano dla staliwa L20HM. Wynika stąd, że liniowa aproksymacja współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury jest wystarczająco dokładna w obliczeniach praktycznych. W związku z powyższym dalsze rozważania dotyczyć będą tylko tego przypadku.

4. Pola temperatur w elementach o liniowej zależności współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury

Załóżmy, że zależność współczynnika λ od temperatury można z dobrym przybliżeniem aproksymować funkcją liniową o postaci

$$\lambda = \lambda_w + \left.\frac{d\lambda}{d\vartheta}\right|_{śr} \cdot \vartheta \tag{8}$$

Rozwiązania (6) i (7) opisujące rozkład temperatury wzdłuż grubości elementu można wtedy przedstawić następująco[x)]

$$\vartheta = \Delta T \left[\pm \sqrt{\frac{1}{A^2 \Delta T^2} + \left(1 + \frac{2}{A \Delta T}\right) \frac{\int_0^{\xi} \frac{d\xi}{H}}{\int_0^1 \frac{d\xi}{H}}} - \frac{1}{A \Delta T} \right] \tag{6.a}$$

$$\vartheta = \bar{q} \left[\pm \sqrt{\frac{1}{A^2 \bar{q}^2} - \frac{2}{A \bar{q}} H(o) \int_0^{\xi} \frac{d\xi}{H}} - \frac{1}{A \bar{q}} \right] \tag{7.a}$$

gdzie:

$$A = \frac{1}{\lambda_w} \left.\frac{d\lambda}{d\vartheta}\right|_{śr}, \qquad \bar{q} = \frac{qh}{\lambda_w}$$

znak "+" - dla $A \Delta T > 0$

znak "-" - dla $A \Delta T < 0$.

W przypadku, gdy $A \to 0$, podane formuły opisują rozkład temperatury w elemencie dla λ = idem

$$\lim_{A \to 0} \vartheta = \vartheta_o$$

Z (6.a) i (7.a) otrzymujemy

$$\vartheta_o = \Delta T \frac{\int_0^{\xi} \frac{d\xi}{H}}{\int_0^1 \frac{d\xi}{H}} \tag{6.b}$$

---

x) W celu uproszczenia zapisu pomijamy indeks 1 w oznaczeniu rozkładu temperatury ϑ_1.

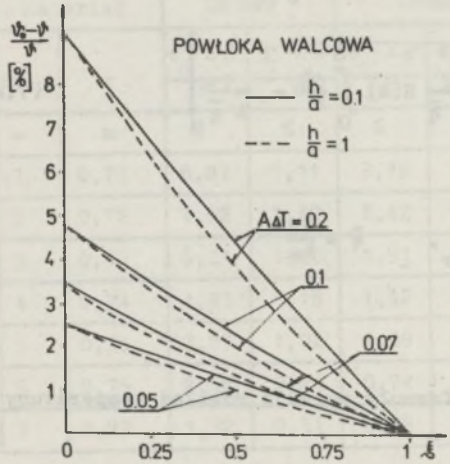
$$\vartheta_o = -\bar{q}\, H(0) \int_0^{\xi} \frac{d\xi}{H} \tag{7.b}$$

W celu określenia wpływu współczynnika przewodzenia ciepła na rozkład temperatury przeanalizowano funkcję

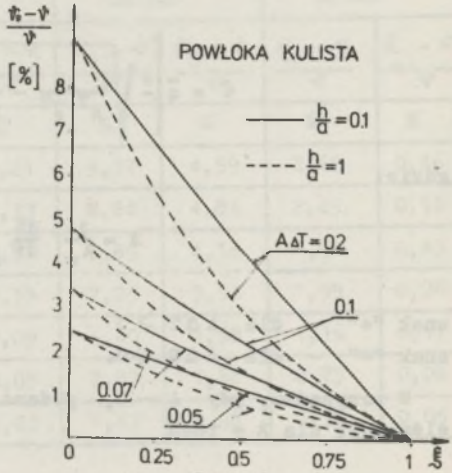
$$\frac{\vartheta_o - \vartheta}{\vartheta} = f(A\,\Delta T, \frac{h}{a}, \xi) \tag{9}$$

dla elementów walcowych i kulistych dla kilku wybranych wartości parametru $A\,\Delta T$ i stosunku h/a. Uzyskane rezultaty przedstawiono na rys. 2 i 3. Dodatkowo na rys. 4 i 5 przedstawiono zależność

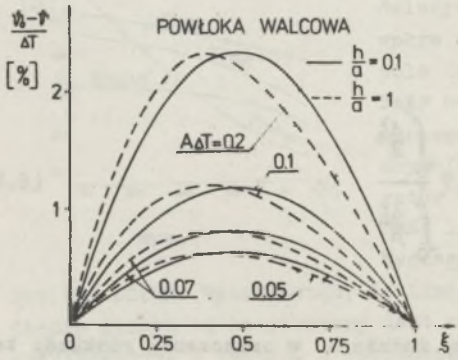
$$\frac{\vartheta_o - \vartheta}{\Delta T} = f(A\,\Delta T, \frac{h}{a}, \xi) \tag{10}$$



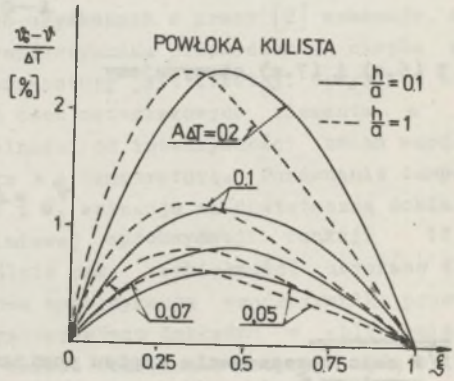
Rys. 2



Rys. 3



Rys. 4



Rys. 5

Maksymalne odchyłki temperatur ϑ i ϑ_o są w pewnych przypadkach dość znaczne, co ze względu na dokładność obliczeń projektowych wymaga uwzględnienia zmienności współczynnika przewodzenia ciepła.

Podobne rezultaty uzyskuje się na podstawie porównania rozwiązań (7.a) i (7.b). W tym przypadku maksymalne odchyłki zależą od stosunku h/a oraz iloczynu $\bar{q}$ A.

5. Wpływ cech geometrycznych na stan cieplny elementów

Postać konstrukcyjna elementów turbin (kadłubów, zaworów, obejm tarcz kierowniczych, króćców) jest z reguły bardzo złożona. Są to najczęściej grubościenne powłoki o dowolnym przekroju poprzecznym i podłużnym. Wyznaczenie pola temperatury a w dalszej kolejności pola naprężeń i odkształceń w elemencie możliwe jest jedynie po przyjęciu pewnego uproszczonego modelu geometrycznego.

Analiza danych literaturowych [1] wskazuje, że w obliczeniach cieplno-wytrzymałościowych turbin wykorzystuje się powszechnie model grubościennej płyty. Dodatkowo przyjmuje się, że w ustalonych warunkach pracy rozkład temperatury wzdłuż grubości ścianki jest liniowy a w czasie nagrzewania paraboliczny.

Błąd spowodowany traktowaniem elementów jako grubościennych płyt oraz wpływ cech geometrycznych na pole temperatury w wybranych elementach turbin oceniono na podstawie porównania rozkładów temperatury wyznaczonych z zależności (6a) i (7a) z odpowiednimi rozkładami ϑ_p dla płyty. Uwzględniając w ostatnim przypadku, że H = 1, mamy

$$\vartheta_p = \Delta T\left[\pm\sqrt{\frac{1}{A^2\,\Delta T^2} + \left(1 + \frac{2}{A\,\Delta T}\right)\xi} - \frac{1}{A\,\Delta T}\right] \tag{11}$$

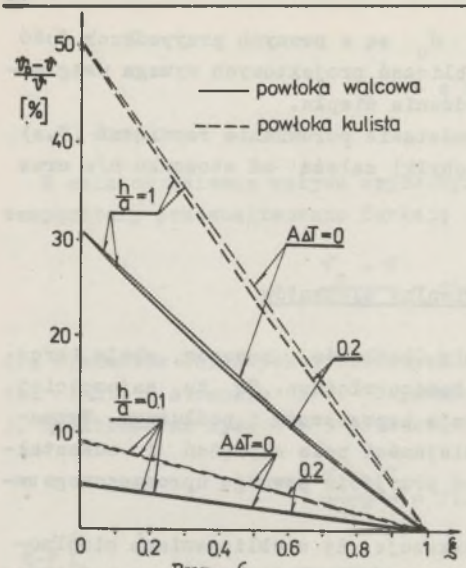
$$\vartheta_p = \bar{q}\left[\pm\sqrt{\frac{1}{A^2\,\bar{q}^2} - \frac{2}{A\,\bar{q}}\xi} - \frac{1}{A\bar{q}}\right] \tag{12}$$

Na rys. 6 i 7 przedstawiono w oparciu o wzory (6a) i (11) przebiegi funkcji

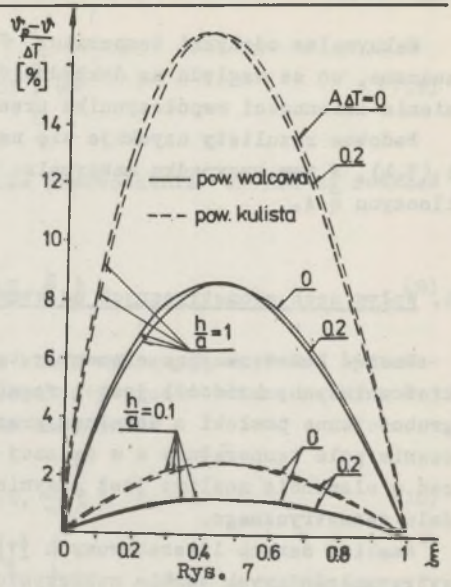
$$\frac{\vartheta_p - \vartheta}{\vartheta} = f(A\,\Delta T, \frac{h}{a}, \xi) \tag{13}$$

oraz

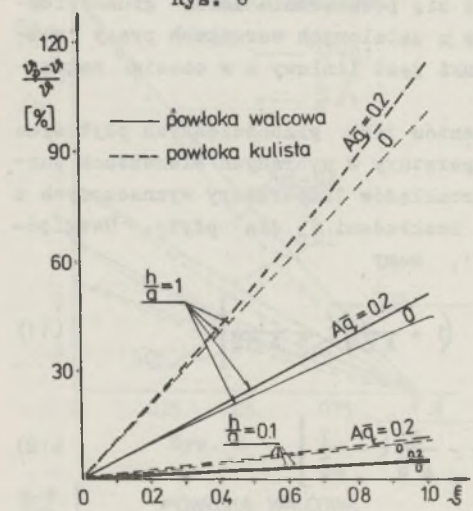
$$\frac{\vartheta_p - \vartheta}{\Delta T} = f(A\,\Delta T, \frac{h}{a}, \xi) \tag{14}$$



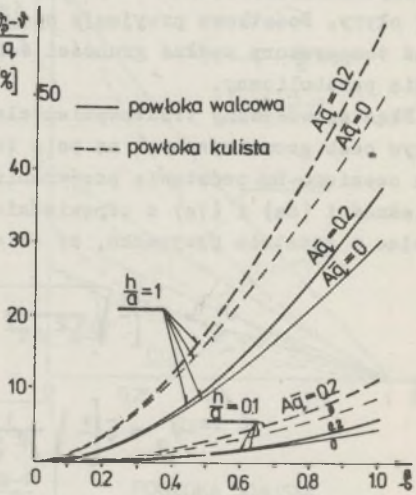
Rys. 6



Rys. 7



Rys. 8



Rys. 9

dla elementów walcowych i kulistych dla kilku wybranych wartości parametru $A\Delta T$ i stosunku h/a, natomiast na rys. 8 i 9 podano przy tych samych założeniach przebiegi funkcji

$$\frac{\vartheta_p - \vartheta}{\vartheta} = f(A\bar{q}, \frac{h}{a}, \xi) \tag{15}$$

oraz

$$\frac{\vartheta_p - \vartheta}{\bar{q}} = f(A\bar{q}, \frac{h}{a}, \xi) \tag{16}$$

opracowane na podstawie zależności (7a) i (12).

6. Analiza uzyskanych rezultatów

Analiza przedstawionych wyników wskazuje, że wpływ materiałowych i geometrycznych cech konstrukcyjnych na pola temperatur w elementach turbin jest istotny. Temperatury wyznaczone z uwzględnieniem i bez uwzględnienia zmienności współczynnika przewodzenia ciepła różnią się w pewnych przypadkach o 8-10%. Znacznie większe rozbieżności wyników uzyskuje się w przypadku aproksymacji elementów turbin modelem grubościennej płyty.

Obliczenia przeprowadzone w niniejszej pracy pozwalają ocenić wpływ cech materiałowych i geometrycznych na pola temperatur w ustalonych warunkach pracy turbiny.

W pierwszej części pracy analizowano pola temperatur w kadłubie turbiny z uwzględnieniem rzeczywistej zależności współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 1.

Uzyskane wyniki porównano z rozkładem temperatur wyznaczonym dla liniowej aproksymacji zależności współczynnika λ od temperatury. Wartości obu rozkładów różnią się nieznacznie a maksymalny błąd tylko w niektórych punktach osiąga wartości 2%. Szczególnie małe rozbieżności uzyskano dla staliwa L-20HM.

Na podstawie uzyskanych rezultatów można wnioskować, że w obliczeniach praktycznych liniowa aproksymacja zależności współczynnika wnikania ciepła od temperatury jest dostatecznie dokładna.

Podany wniosek ma duże znaczenie przy realizacji obliczeń za pomocą maszyn cyfrowych. Przez aproksymację funkcji $\lambda = \lambda(T)$ funkcją liniową unikamy jej tabelarycznego wprowadzania do pamięci maszyny.

Dalsze analizy i obliczenia prowadzone w niniejszej pracy odnoszą się do elementów turbin o liniowej zależności współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury. W tym przypadku różnice temperatur wyznaczonych dla zmiennego i stałego współczynnika λ zależą głównie od parametru A charakteryzującego stopień zmienności współczynnika przewodzenia ciepła. Wpływ ten zależy od stosunku grubości ścianki do promienia wewnętrznego elementu h/a. Wspomniane zależności zilustrowano na rys. 2-5 dla powłoki walcowej oraz kulistej.

Przebieg krzywych wskazuje, że zależność odchyłek temperatur od parametru A jest bardzo silna. Odchyłki te wzrastają ze wzrostem parametru A.

Z podanych wykresów wynika, że wpływ stosunku h/a jest mniejszy. Różnica temperatur zmniejsza się wraz ze wzrostem tego stosunku.

Wpływ współczynnika przewodzenia ciepła na ustalony rozkład temperatur w powłoce walcowej jest większy niż w powłoce kulistej.

W przypadku określenia pola temperatury w kadłubie turbiny wykonanym ze staliwa L21HMF iloczyn $A\Delta T$ waha się w granicach od 0,16-0,2, natomiast dla staliwa L20HM $A\Delta T$ waha się od 0,055-0,06.

Na podstawie przedstawionych rysunków widać, że w pierwszym przypadku (dla staliwa L21HMF) należy uwzględnić zmianę λ ponieważ w przeciwnym wy-

padku maksymalna różnica $\vartheta_o - \vartheta$ osiąga wartość 9% temperatury względnie 2% różnicy ΔT.

Przy wyznaczaniu rozkładu temperatury w elementach wykonanych ze staliwa L20HM można korzystać ze średniej wartości współczynnika przewodzenia ciepła $\lambda_{śr}$. Takie założenie prowadzi do błędów rzędu 2%.

W końcowej części pracy analizowano wpływ cech geometrycznych na pole temperatury w wybranych elementach turbin. Określono błędy spowodowane traktowaniem elementów jako grubościennych płyt. Uzyskane rezultaty przedstawiono na rys. 6-9. Przebieg krzywych wskazuje, że różnica temperatur $\vartheta_p - \vartheta$ bardzo silnie zależy od stosunku h/a. W przypadku h/a = 1 stosowanie modelu grubościennej płyty prowadzi do znacznych rozbieżności ze stanem rzeczywistym. Przy mniejszych wartościach h/a uzyskujemy mniejsze rozbieżności. Wynika stąd wniosek, że w obliczeniach np. zaworów regulacyjnych, kadłubów części wysokoprężnych, króćców nie można stosować modelu grubościennej płyty. Uproszczenie takie można natomiast przyjąc w obliczeniach kadłubów zewnętrznych i średnioprężnych.

LITERATURA

[1] Kosman G.: Modele obciążeń cieplnych w zagadnieniach syntezy turbin parowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej "Energetyka" z. 60, 1977.

[2] Chmielniak T., Kosman G.: Analiza czynników wpływających na stan cieplny elementów turbin. Praca naukowo-badawcza, Gliwice, 1976.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЧЕРТ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ТУРБИН ПРИ СТАЦИОНАРНОЙ НАГРУЗКЕ

Р е з ю м е

В работе дан анализ влияния отдельных конструкционных черт на тепловое состояние элементов турбин при стационарной нагрузке. Сравнено тепловое состояние элементов определенное с использованием и без использования зависимости коэффициента теплопроводности от температуры.

THE INFLUENCE OF CONSTRUCTIONAL PARAMETERS ON THE THERMAL STATE OF TURBINE ELEMENTS AT THE CONSTAT LOAD

S u m m a r y

In the paper the influence of materials and geometrical constructional charakteristics on the temperature range in the turbine elements in the constant operating conditions has been analysed.

The determined thermal states have been compared with and without considering the dependance of heat transfer coefficients on the temperature. The calculations have been carried out for different construcional and dimensional turbine elements.