

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPŁYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

75

WARSZAWA—POZNAN 1978

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPIYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

KOMITET REDAKCYJNY — EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA — EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright

by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1978

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 370+90 egz.	Oddano do składania 13 VII 1977 r.
Ark. wyd. 14. Ark. druk. 11,25	Podpisano do druku 22 maja 1978 r.
Papier druk. mat. kl. V, 70 g	Druk ukończono w maju 1978 r.
Nr zam. 761/58	Cena zł 45,— J-7/292

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. Mickiewicza w Poznaniu

GERARD KOSMAN

Gliwice

Kryteria oceny obciążeń cieplnych turbin parowych w warunkach eksploatacji

W pracy przedstawiono zagadnienie kontroli obciążeń cieplnych turbin parowych w różnych warunkach pracy. Omówiono metody modelowania pól temperatur i naprężeń w elementach turbin na podstawie eksperymentalnie określonej temperatury brzegu. Podano uogólniony algorytm oceny obciążeń cieplnych oparty na ciągłej rejestracji temperatury w punktach charakterystycznych. Przedstawiono temperaturowe kryteria oceny obciążeń cieplnych. Ogólne rozwiązanie podano dla trójwymiarowego modelu nagrzewania grubościennych elementów turbin. Rozważania szczegółowe przeprowadzono dla dwuwymiarowego modelu nagrzewania kadłuba.

Wykaz oznaczeń

A – zbiór punktów brzegowych elementu,	$\vec{x} = [x_1, x_2, x_3]$ – wektor wodzący punktu,
c – ciepło właściwe,	$\vec{X} = [X_1, X_2, X_3]$ – wektor sił masowych,
H_t, H_η, H_ζ – współczynniki Lamego,	$\vec{X} = [\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3]$ – wektor sił powierzchniowych,
p – ciśnienie,	$\vec{Y}_i$ – wektorowe funkcje współrzędne,
T – temperatura,	σ – naprężenie,
t – czas,	ε – odkształcenie,
$\vec{u} = [u_1, u_2, u_3]$ – wektor przemieszczenia,	ρ – gęstość,
$w = \ln r/r_a$ – bezwymiarowa współrzędna geometryczna,	μ, λ, γ – stałe Lamego,
V – zbiór punktów wewnętrznych elementów,	ξ, η, ζ – współrzędne krzywoliniowe,
V_i – funkcje współrzędne,	λ^* – przewodność cieplna.

1. Wprowadzenie

Obciążenia cieplne turbin parowych są określone przez pola temperatur występujące w elementach składowych. Pola te stanowią dane wejściowe do określenia gradientów temperatur, strumieni ciepła, a także naprężeń i odkształceń cieplnych.

Metody oceny obciążeń cieplnych dzielą się na dwie zasadnicze grupy [1] – metody o charakterze pośrednim i bezpośrednim. Bezpośrednia ocena obciążenia cieplnego polega na rozpatrywaniu temperatur i ich gradientów. Pośrednia ocena obciążenia cieplnego sprowadza się do rozpatrywania odkształceń i naprężeń cieplnych.

W dowolnych warunkach pracy turbiny naprężenia i odkształcenia elementów muszą być mniejsze od wartości dopuszczalnych

$$(\sigma, u) \leq (\sigma, u)_{\text{dop}}. \quad (1)$$

Wynika stąd, że w czasie rozruchu i eksploatacji turbiny powinno się stale kontrolować wartości naprężeń i odkształceń w poszczególnych, najbardziej obciążonych elementach turbiny.

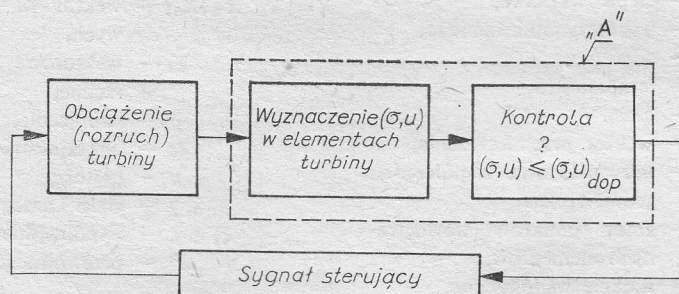
Na podstawie tych danych można bezpiecznie prowadzić rozruch oraz ręczne lub zautomatyzowane obciążanie turbozespołu, a następnie normalną jego eksploatację.

2. Kontrola obciążeń cieplnych turbin parowych

Stosowane obecnie rozwiązania układów sterujących, realizujących rozruch i obciążanie turbiny w zależności od naprężeń i odkształceń cieplnych bywają bardzo różnorodne. Ogólny schemat blokowy kontroli obciążeń cieplnych turbin parowych przedstawiono na rys. 1.

Praktyczna realizacja kontroli obciążeń cieplnych zależy od sposobu wyznaczenia stanu naprężenia i odkształcenia w elementach turbin. Można tu wyróżnić trzy podstawowe metody postępowania:

- wyznaczenie naprężeń i odkształceń na drodze pomiarowej,
- wyznaczenie naprężeń i odkształceń na drodze obliczeniowej oparte na pomiarze temperatury na brzegu elementu,
- wykorzystanie elementarnych kryteriów rozruchu i eksploatacji.

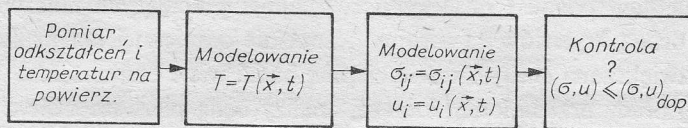


Rys. 1. Schemat blokowy kontroli obciążeń cieplnych

Najbardziej pełne informacje o przebiegu procesu nagrzewania uzyskuje się stosując pierwszą z wymienionych metod (rys. 2). Należy jednak dodać, że w teorii eksploatacji *turbin cieplnych analizuje się obecnie tylko wybrane formy odkształcenia elementów*, szczególnie proste do kontroli i rejestracji, a mianowicie wydłużenia cieplne wirników i kadłubów, ugięcie i ekscentryczność wału oraz drgania łożysk.

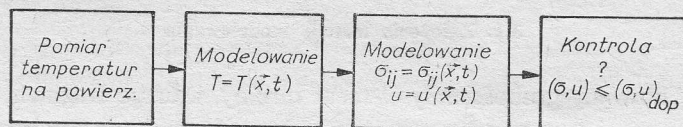
Stosowane metody badawcze nie pozwalają na dokładne i pewne kontrolowanie naprężeń i odkształceń w zmiennych warunkach pracy turbiny. Wynika to z faktu, że tensometryczne pomiary odkształceń w wysokich temperaturach jeszcze ciągle sprawiają wiele

trudności. Z drugiej strony ograniczenie możliwości eksperymentalnego badania naprężeń wynika z braku metod opracowywania rezultatów pomiarów, opartych na rozwiązaniach teoretycznych mechaniki ciał okształcalnych i umożliwiających wyznaczenie wartości naprężeń w tych punktach badanego elementu, gdzie bezpośredni pomiar nie jest możliwy.



Rys. 2. Wyznaczenie naprężeń i odkształceń na podstawie pomiaru odkształceń i temperatur na powierzchni elementów (fragment „A” w schemacie na rys. 1)

Badania doświadczalne prowadzone na rzeczywistych obiektach sprowadzają się w ogromnej większości przypadków do pomiaru temperatur w różnych punktach turbiny. W tej sytuacji jedyną praktyczną metodą oceny naprężeń w elementach turbin jest eksperymentalne określenie temperatury brzegu oraz wyznaczenie rozkładu temperatury i naprężeń



Rys. 3. Wyznaczenie naprężeń i odkształceń na podstawie pomiaru temperatur na powierzchni elementów (fragment „A” w schemacie na rys. 1)

wewnątrz elementu metodami obliczeniowymi lub analogowymi. W tym przypadku fragment „A” w schemacie blokowym kontroli obciążeń cieplnych przedstawia się jak na rys. 3. Ta metoda kontroli jest analizowana w literaturze i to zarówno od strony teoretycznej, jak również zastosowań praktycznych [np. 2, 3, 4, 7]. Prowadzone badania opierają się jednak prawie wyłącznie na uproszczonych, jednowymiarowych modelach nagrzewania, w których uwzględnia się jedynie zmianę temperatury wzdłuż grubości ścianki. Dodatkowym uproszczeniem jest traktowanie procesu nagrzewania jako quasi-stacjonarnego [3, 4, 5], a nawet ustalonego [6, 7]. Takie podejście ogranicza zakres stosowania otrzymanych tą drogą rozwiązań.

W ostatniej z wymienionych metod realizacji kontroli obciążeń fragment „A” w schemacie blokowym zastępuje się zespołem elementarnych kryteriów rozruchu, których spełnienie informuje o prawidłowości przebiegu procesu uruchamiania turbiny.

Elementarne kryteria optymalnego rozruchu i eksploatacji turbin rozumiane jako ograniczenia wielkości sterowanych można podzielić na trzy grupy [8]:

- kryteria temperaturowe,
- kryteria odkształceniowe,
- kryteria dynamiczne.

Do temperaturowych kryteriów należą wyłącznie różnice temperatur mierzone w różnych punktach turbiny lub różnice między temperaturą pary i metalu. Kryteria odkształce-

niowe wyznaczają dopuszczalną wartość ugięcia wału i wirnika, mimośrodowości wału, wydłużeń termicznych wirników i kadłubów. Kryteria dynamiczne określają parametry ruchu drgającego turbozespołu uznane za granicznie dopuszczalne, a więc takie, przy których pracę maszyny uważa się za niedopuszczalnie niespokojną.

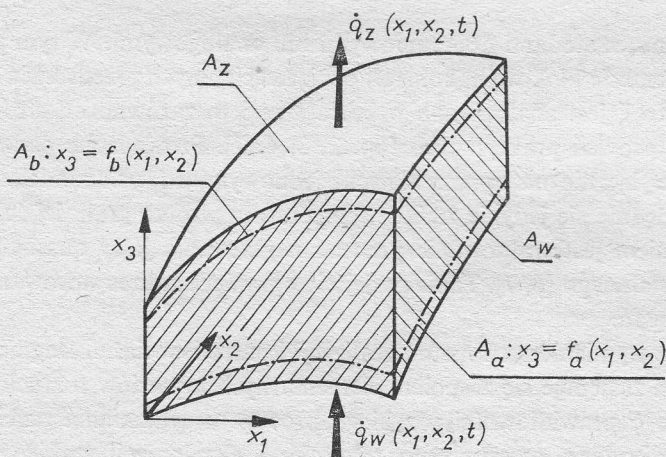
Wartości kryteriów elementarnych są ustalone na podstawie informacji zebranych w czasie długoletnich badań i obserwacji rozruchów pracujących maszyn. Przenoszenie uzyskanych tą drogą kryteriów na turbiny o zupełnie odmiennej konstrukcji, charakteryzującej się np. zwiększoną elastycznością cieplną budzi wiele zastrzeżeń.

W niniejszej pracy przedmiotem szerszej analizy będą pierwsze dwie z wymienionych metod kontroli obciążeń cieplnych. W szczególności omówiono modelowanie pola temperatur i naprężeń w elementach turbin na podstawie eksperymentalnie określonej temperatury brzegu oraz wyznaczono temperaturowe kryteria oceny obciążeń cieplnych turbin parowych.

3. Modelowanie pola temperatur i naprężeń w elementach turbin na podstawie eksperymentalnie określonej temperatury brzegu

3.1. Założenia metody modelowania

Rozpatrzmy dowolny grubościenny element turbiny, którego fragment przedstawiono na rys. 4. Punkty pomiaru temperatury metalu obiera się w pobliżu powierzchni wewnętrznej A_w i zewnętrznej A_z lub wprost na tych powierzchniach.



Rys. 4. Wycinek grubościennego elementu turbiny

Powierzchnie, w których mierzymy temperatury oznaczmy odpowiednio A_a i A_b (rys. 4). Powierzchnię A_a opisuje funkcja $x_3 = f_a(x_1, x_2)$, natomiast powierzchnię A_b funkcja $x_3 = f_b(x_1, x_2)$. Rozkład temperatury w objętości ograniczonej powierzchniami

A_a i A_b opisuje następujące zagadnienie początkowo-brzegowe

$$\nabla[\lambda^*(T)\nabla T] = c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

$$T(\vec{x}, 0) = T_0(\vec{x}), \quad \vec{x} \in V + A_a + A_b, \quad (3)$$

$$T = T_i(\vec{x}, t), \quad \vec{x} \in A_i \quad (i = a, b). \quad (4)$$

Po rozwiązaniu tak sformułowanego zagadnienia można ekstrapolować uzyskany rozkład temperatury i ocenić temperaturę oraz jej gradient na powierzchniach elementu, a następnie wyznaczyć naprężenia i odkształcenia.

Szczegółowa analiza stanu naprężenia i odkształcenia w badanym elemencie powinna dostarczyć informacji o zachowaniu się materiału nie tylko w obszarze odkształceń sprężystych, ale również przy obciążeniach wywołujących odkształcenia plastyczne.

Termosprężysty stan naprężenia i odkształcenia opisuje układ trzech równań przemieszczeniowych. Równanie przemieszczeniowe, np. dla kierunku 1 przyjmuje postać

$$\nabla(\mu \nabla u_1) + \frac{\partial}{\partial x_1} [(\lambda + \mu)\theta - \gamma T] - \frac{\partial \mu}{\partial x_1} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial x_2} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial \mu}{\partial x_3} \frac{\partial u_3}{\partial x_1} + X_1 = 0. \quad (5)$$

Dwa dalsze równania otrzymamy przez cykliczną zmianę wskaźników. Obciążenia masowe są siłami odśrodkowymi wirujących własnych mas. Intensywność tego obciążenia jest równa

$$j = \rho \omega^2 r. \quad (6)$$

W przypadku gdy stałe materiałowe μ , λ i γ traktujemy jako niezależne od temperatury, układ równań przemieszczeniowych upraszcza się do postaci

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \text{grad div } \vec{u} - \gamma \text{grad } T + \vec{X} = 0. \quad (7)$$

Rozwiązanie równań (5) i (7) musi spełniać warunki brzegowe

$$\vec{u} = \vec{u}_A(\vec{x}, t), \quad \vec{x} \in A, \quad t > 0, \quad (8)$$

gdy zadane są przemieszczenia na powierzchni elementu lub

$$\bar{X}_i = \sum_j \sigma_{ij} \cos(n, x_j) \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (9)$$

gdy znany jest rozkład obciążeń. Na powierzchniach omywanych czynnikiem roboczym o ciśnieniu p składowe sił powierzchniowych są równe

$$\bar{X}_i = -p \cos(n, x_i) \quad (i = 1, 2, 3). \quad (10)$$

3.2. Modelowanie procesu nagrzewania grubościennych elementów turbin

Badania procesu nagrzewania grubościennych elementów turbin podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie badań analizowano pola temperatur bez uwzględnienia zależności stałych materiałowych od temperatury. W tym przypadku do rozwiązania zagadnienia (2) zastosowano opracowaną w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych przybliżoną metodę analityczną opisaną w publikacjach [9, 10].

W drugim etapie badań uwzględniono zmienność stałych materiałowych wraz z temperaturą. Do wyznaczenia pól temperatur zastosowano bezpośrednią metodę różnicową. W związku z tym uogólniono metodę bilansów elementarnych na dowolne ortogonalne układy współrzędnych krzywoliniowych [11]. Podstawowe formuły obliczeniowe dla obu przypadków zebrano w załączniku nr 1.

3.3. Modelowanie pola przemieszczeń i naprężeń w elementach turbin

Rozwiązanie zagadnienia (5)÷(10) sprowadzić można do rozwiązania zagadnienia wariacyjnego na minimum odpowiedniego funkcjonału w zbiorze funkcji wektorowych spełniających podane warunki brzegowe [9, 12]. Tak otrzymane zagadnienie wariacyjne można następnie rozwiązać jedną z metod przybliżonych. Odpowiednie wzory obliczeniowe zestawiono w załączniku nr 2. Wzory te są słuszne gdy stałe materiałowe nie zależą od temperatury.

Do rozwiązania sformułowanego zadania z uwzględnieniem zależności stałych materiałowych od temperatury stosujemy opisaną w [13, 14] metodę siatek. Zasady konstruowania odpowiedniej siatki oraz równań różnicowych podano w załączniku nr 2.

Małe odkształcenia sprężysto-plastyczne wyznaczyć można metodą zmiennych parametrów materiałowych [15, 16].

4. Uogólniony algorytm oceny obciążeń cieplnych oparty na ciągłej rejestracji temperatury w punktach charakterystycznych

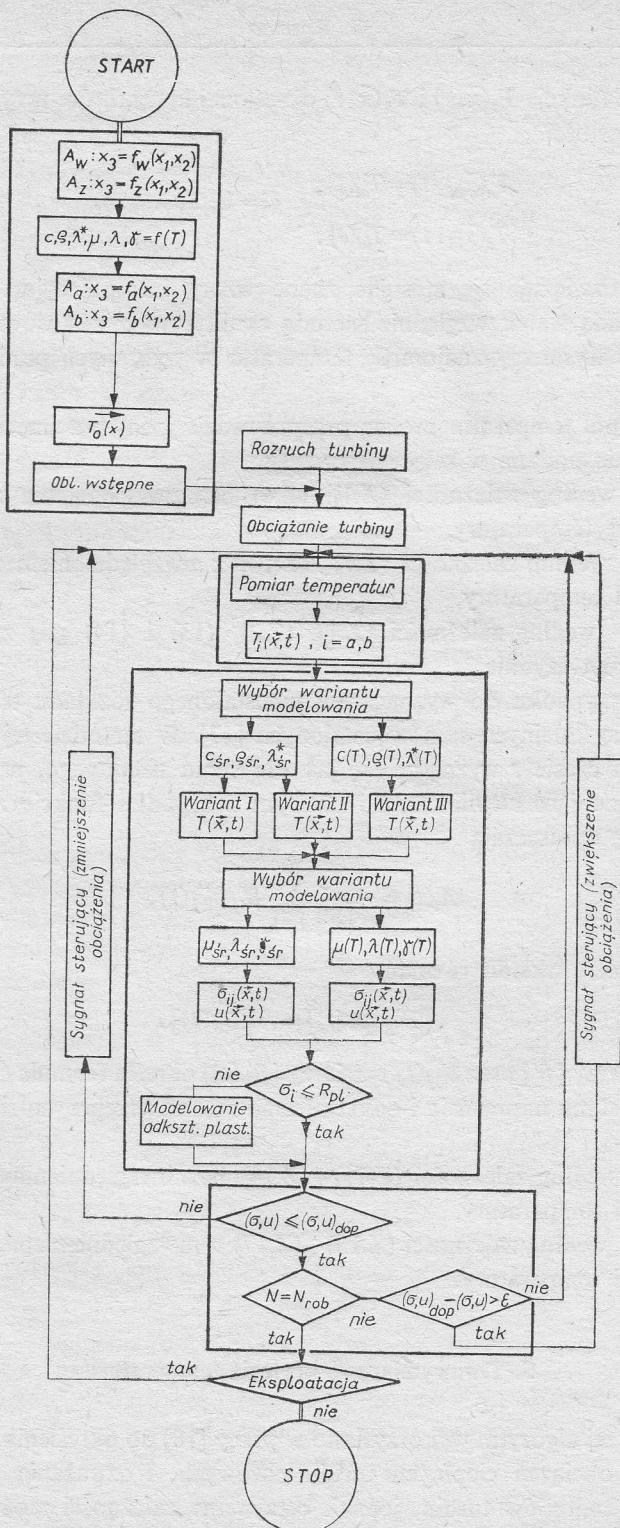
Omówione metody modelowania pól temperatur, naprężeń i odkształceń w elementach turbin można wykorzystać do opracowania szczegółowego algorytmu kontroli obciążeń cieplnych turbin parowych na podstawie ciągłej rejestracji temperatury w punktach charakterystycznych, na bazie ogólnych schematów 1 i 3. Schemat blokowy tego algorytmu podano na rys. 5. Można w nim wyróżnić cztery podstawowe bloki: „wstęp”, „pomiar”, „modelowanie” i „kontrola”.

Wewnątrz bloku „wstęp” wykonywane są następujące czynności:

- ustalenie kształtu rozpatrywanego elementu, a więc ustalenie funkcji $x_3 = f_w(x_1, x_2)$ oraz $x_3 = f_z(x_1, x_2)$ opisujących odpowiednio powierzchnię wewnętrzną A_w i zewnętrzną A_z ,
- ustalenie zależności stałych materiałowych ($c, \rho, \lambda^*, \mu, \lambda$ i γ) od temperatury,
- wybór punktów pomiaru temperatury, tzn. ustalenie powierzchni A_a i A_b oraz funkcji $x_3 = f_a(x_1, x_2)$ i $x_3 = f_b(x_1, x_2)$,
- obliczenia wstępne,
- ustalenie początkowego rozkładu temperatury w badanym elemencie.

W bloku „pomiar” dokonuje się pomiaru temperatury w ustalonych wcześniej punktach powierzchni A_a i A_b , a następnie na podstawie uzyskanych wyników określa się funkcje $T_a(\vec{x}, t)$ i $T_b(\vec{x}, t)$.

Niech $\vec{x}_{ai}$ oraz $\vec{x}_{bi}$ ($i=1, 2, \dots, m$) oznaczają punkty pomiaru temperatury na powierzchniach A_a i A_b , natomiast $T_{ai}(t)$ oraz $T_{bi}(t)$ pomierzone wartości temperatur w tych punktach w czasie t .



Rys. 5. Schemat blokowy algorytmu oceny obciążeń cieplnych na podstawie ciągłej rejestracji temperatur w punktach charakterystycznych

Należy znaleźć funkcje $T_a(\vec{x}, t)$ i $T_b(\vec{x}, t)$ określonej klasy, które przyjmują w punktach $\vec{x}_{ai}$ i $\vec{x}_{bi}$ znane wartości

$$T_a(\vec{x}_{ai}, t) = T_{ai}(t), \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

$$T_b(\vec{x}_{bi}, t) = T_{bi}(t). \quad (12)$$

Zagadnienie to rozwiązuje się stosując znane wzory interpolacyjne. Jeżeli obliczenie prowadzi się metodą siatek względnie metodą analityczną z zastosowaniem całkowania numerycznego, to wystarczy znajomość temperatur w wybranych punktach powierzchni A_a i A_b .

Modelowanie pól temperatur można przeprowadzić jednym z trzech wariantów (opis bloku modelowania podano w załączniku nr 1):

Wariant I – według zależności (Z.1)÷(Z.6) bez uwzględnienia zależności stałych materiałowych od temperatury,

Wariant II – według zależności (Z.7)÷(Z.10) z uwzględnieniem zależności stałych materiałowych od temperatury,

Wariant III – według zależności (Z.1), (Z.3), (13) i (14) gdy zmiany temperatur w czasie nie są zbyt szybkie.

W ostatnim przypadku do wyznaczenia nieustalonego rozkładu temperatury można zastosować metodę kolejnych stanów ustalonych [17]. W metodzie tej rozkład temperatury w dowolnym czasie t wyznacza się jak dla stanu ustalonego, przyjmując warunki brzegowe odpowiadające chwili czasu t . W tym przypadku funkcje $A_i(t)$ w zależności (Z.1) znacznie się upraszczają

$$A_i(t) = -\frac{1}{[B']} \sum_{j=1}^n B'_{ij} b'_{0j}(t), \quad (13)$$

tzn. są rozwiązaniem układu równań

$$[B'] [A(t)] = -[B'_0(t)]. \quad (14)$$

Elementy b'_{ij} macierzy $[B']$ oraz $b'_{0j}(t)$ macierzy $[B'_0(t)]$ określa formuła (Z.3).

Modelowanie stanu naprężenia i odkształcenia można przeprowadzić jednym z dwóch wariantów:

Wariant I – według zależności (Z.11)÷(Z.14) bez uwzględnienia zależności stałych materiałowych od temperatury,

Wariant II – według zależności (Z.15)÷(Z.17) z uwzględnieniem zależności stałych materiałowych od temperatury.

5. Dwuwymiarowe kryteria temperaturowe

Omówiony wyżej algorytm wykorzystano w pracy [18] do określenia dwuwymiarowych kryteriów oceny obciążeń cieplnych turbin parowych. Rozważania szczegółowe przeprowadzono dla kadłubów turbin, jednak otrzymane zależności można zastosować do oceny i optymalizacji warunków nagrzewania dowolnych elementów w kształcie grubościennnej powłoki walcowej o dowolnym przekroju poprzecznym.

5.1. Dwuwymiarowy model nagrzewania kadłubów turbiny

Z analizy pola temperatur w przekroju poprzecznym kadłuba (rys. 6) wynika, że rozkład temperatury na powierzchni wewnętrznej kadłuba można z dostateczną dokładnością aproksymować równaniem [18]

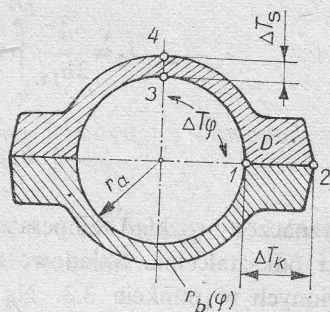
$$T_a(\varphi, t) = A(t) + B(t) \cos 2\varphi \quad \text{dla} \quad w=0. \quad (15)$$

Podobnie temperaturę na powierzchni zewnętrznej można opisać formułą

$$T_b(\varphi, t) = T_a(\varphi, t) - \Delta T(\varphi, t) = T_a(\varphi, t) - C(t) - D(t) \cos 2\varphi \quad \text{dla} \quad w = w_b(\varphi), \quad (16)$$

gdzie $w = \ln r/r_a$, $w_b(\varphi) = \ln r_b(\varphi)/r_a$ – funkcja opisująca powierzchnię zewnętrzną kadłuba, r_a – promień wewnętrzny kadłuba.

Dla tak określonych warunków brzegowych, pole temperatur w przekroju poprzecznym



Rys. 6. Przekrój poprzeczny kadłuba turbiny
(1, 2, 3, 4 – miejsca zainstalowania termopar)

kadłuba, na podstawie formuł (Z.1), (Z.3), (13) i (14), można opisać w układzie współrzędnych w, φ zależnościami

$$T_n(w, \varphi, t) = V_0(w, \varphi, t) + \sum_{i=1}^n A_i(t) V_i(w, \varphi), \quad (17)$$

gdzie

$$V_0(w, \varphi, t) = \frac{w}{w_b(\varphi)} [T_b(\varphi, t) - T_a(\varphi, t)] + T_a(\varphi, t), \quad (18)$$

$$V_i(w, \varphi) = w^i [w_b(\varphi) - w] \cos 2(i-1)\varphi.$$

Funkcje $A_i(t)$ są rozwiązaniem układu równań

$$\sum_{i=1}^n A_i(t) b_{ij} = -b_{0j}(t) \quad (j=1, 2, \dots, n), \quad (19)$$

gdzie

$$b_{ij} = \iint \left(\frac{\partial V_i}{\partial w} \frac{\partial V_j}{\partial w} + \frac{\partial V_i}{\partial \varphi} \frac{\partial V_j}{\partial \varphi} \right) dw d\varphi.$$

Podane zależności pozwalają wyznaczyć nieustalony rozkład temperatury w przekroju poprzecznym kadłuba na podstawie ciągłego pomiaru temperatury w czterech punktach (dla określenia funkcji $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ i $D(t)$).

Łącząc zależności (17), (18) i (19) można n -te przybliżenie pola temperatur przedstawić w formie

$$T_n = f_n[w, \varphi, A(t), B(t), C(t), D(t)]. \quad (20)$$

Przykładowo dla $n=1$ mamy

$$T_1(w, \varphi, t) = A(t) + B(t) \cos 2\varphi - \frac{w}{w_b} [C(t) + D(t) \cos 2\varphi] + w(w_b - w) \times \\ \times [J_1 B(t) - J_2 D(t) - J_3 C(t)], \quad (21)$$

gdzie

$$J_1 = \frac{1}{b_{11}} \int_0^{\pi/2} w_b^2 w'_b \sin 2\varphi d\varphi, \quad J_3 = \frac{1}{3b_{11}} \int_0^{\pi/2} w_b w_b'^2 d\varphi, \\ J_2 = \frac{1}{3b_{11}} \int_0^{\pi/2} w_b^2 w'_b \left(2 \sin 2\varphi + \frac{w'_b}{w_b} \cos 2\varphi \right) d\varphi, \quad (22) \\ b_{11} = \frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} w_b^3 (1 + w_b'^2) d\varphi.$$

Wyznaczony rozkład temperatury wywoła w kadłubie odpowiadający mu stan naprężenia i odkształcenia. Składowe tensora naprężenia można wyznaczyć jedną z metod omówionych w punkcie 3.3. Na podstawie zależności (Z.11)÷(Z.14) naprężenie zredukowane (n -te przybliżenie) można przedstawić w formie

$$\sigma_{red, n} = F_n[w, \varphi, A(t), B(t), C(t), D(t)]. \quad (23)$$

Przykładowo, dla $n=1$ mamy [18]

$$\sigma_{red} = \frac{\beta E}{1-\nu} \{ [J_1 B(t) - J_2 D(t) - J_3 C(t)] [\overline{w(w_b - w)} - w(w_b - w)] \} + \\ - D(t) \left[\left(\frac{w}{w_b} \cos 2\varphi \right) - \frac{w}{w_b} \cos 2\varphi \right] + B(t) [\overline{\cos 2\varphi} - \cos 2\varphi] + \\ - C(t) \left[\left(\frac{w}{w_b} \right) - \frac{w}{w_b} \right] + \frac{\Delta p \Delta A_p}{\iint_D e^{2w} dw d\varphi}, \quad (24)$$

gdzie $\Delta p \Delta A_p$ – siła wzdłużna wywołana różnicą ciśnień pary p , działającą na powierzchni ΔA_p , $f(w, \varphi)$ – wartość średnia (całkowa) funkcji $f(w, \varphi)$ w obszarze D określona następująco

$$\overline{f(w, \varphi)} = \frac{\iint_D f(w, \varphi) e^{2w} dw d\varphi}{\iint_D e^{2w} dw d\varphi}. \quad (25)$$

5.2. Wybór punktów pomiaru temperatury

Kontrola obciążeń cieplnych w kadłubach turbin w warunkach rozruchu i eksploatacji sprowadza się, na podstawie przeprowadzonych rozważań, do pomiaru temperatury w czterech charakterystycznych punktach przekroju.

Na podstawie danych literaturowych (np. [6, 18, 19, 20]) do dalszych rozważań przyjęto układ pomiarowy z rozmieszczeniem miejsc zainstalowania termopar jak na rys. 6. W celu uproszczenia formuł obliczeniowych założono, że punkty pomiaru znajdują się na powierzchniach kadłuba. W praktyce temperaturę mierzy się w pobliżu powierzchni wewnętrznej (w odległości δ od niej).

W czasie rozruchu i eksploatacji turbiny należy mierzyć i rejestrować:

- temperaturę na powierzchni wewnętrznej kadłuba T_1 (w punkcie 1),
- różnicę temperatur na grubości kołnierza ΔT_k

$$\Delta T_k = T_1 - T_2,$$

- różnicę temperatur na grubości ścianki ΔT_s

$$\Delta T_s = T_3 - T_4,$$

- różnicę temperatur na powierzchni wewnętrznej w kierunku obwodowym ΔT_ϕ

$$\Delta T_\phi = T_3 - T_1.$$

Te cztery wielkości wystarczą do określenia funkcji A , B , C i D , występujących w formułach (15), (16), (21) oraz (24). Po przekształceniach otrzymujemy:

$$\begin{aligned} A(t) &= T_1 + \frac{\Delta T_\phi}{2}, & B(t) &= -\frac{\Delta T_\phi}{2}, \\ C(t) &= \frac{\Delta T_k + \Delta T_s}{2}, & D(t) &= \frac{\Delta T_k - \Delta T_s}{2}, \end{aligned} \quad (26)$$

Dla tak przyjętych punktów pomiaru temperatury funkcja opisująca n -te przybliżenie naprężenia zredukowanego przyjmuje postać

$$\sigma_{\text{red}, n} = \frac{\beta E}{2(1-\nu)} [\Delta T_k A_k(w, \varphi) + \Delta T_s A_s(w, \varphi) + \Delta T_\phi A_\phi(w, \varphi)] + \Delta p A_p. \quad (27)$$

Dla $n=1$ funkcje A_k , A_s , A_ϕ oraz współczynnik A_p są określone następująco

$$\begin{aligned} A_k(w, \varphi) &= \frac{w}{w_b} \left(1 + \cos 2\varphi \right) - \left(\frac{\bar{w}}{w_b} \right) + (J_2 + J_3) [w(w_b - w) - \overline{w(w_b - w)}] - \left(\frac{w}{w_b} \cos 2\varphi \right), \\ A_s(w, \varphi) &= \frac{w}{w_b} (1 - \cos 2\varphi) - \left(\frac{\bar{w}}{w_b} \right) + (J_3 - J_2) [w(w_b - w) - \overline{w(w_b - w)}] + \left(\frac{w}{w_b} \cos 2\varphi \right), \\ A_\phi(w, \varphi) &= \cos 2\varphi - \overline{\cos 2\varphi} + J_1 [w(w_b - w) - \overline{w(w_b - w)}], \end{aligned} \quad (28)$$

$$A_p = \frac{\Delta A_p}{\iint_D e^{2w} dw d\varphi}.$$

5.3. Dopuszczalna zredukowana różnica temperatur

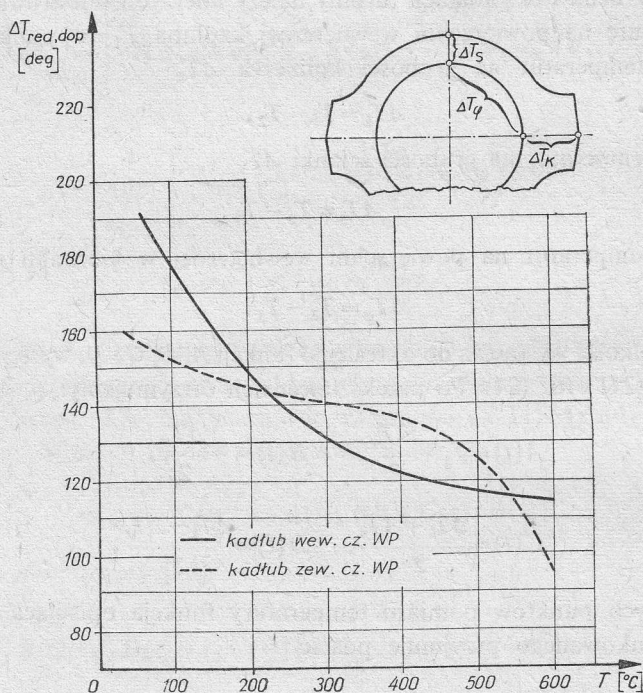
Warunek bezpiecznej pracy polegający na utrzymaniu naprężeń w elementach w granicach dopuszczalnych*

$$\sigma_{\text{red, max}} \leq \sigma_{\text{dop}} \quad (29)$$

przyjmuje, na podstawie (27), postać

$$\max_D \left| \Delta T_k A_k(w, \varphi) + \Delta T_s A_s(w, \varphi) + \Delta T_\varphi A_\varphi(w, \varphi) + \frac{2(1-\nu)}{\beta E} A_p \Delta p \right| \leq \frac{2(1-\nu)}{\beta E} \sigma_{\text{dop}} \quad (30)$$

Lewa strona nierówności (30) przedstawia pewną zastępczą (zredukowaną) różnicę tempe-



Rys. 7. Dopuszczalna zredukowana różnica temperatur w kadłubach turbiny

ratur w elemencie, natomiast strona prawa dopuszczalną wartość tej różnicy. Nierówność (30) można więc zapisać w formie skróconej

$$\Delta T_{\text{red}} \leq \Delta T_{\text{red, dop}}, \quad (31)$$

gdzie

ΔT_{red} – zredukowana różnica temperatur w elemencie

$$\Delta T_{\text{red}} = \max_D \left| \Delta T_k A_k(w, \varphi) + \Delta T_s A_s(w, \varphi) + \Delta T_\varphi A_\varphi(w, \varphi) + \frac{2(1-\nu)}{\beta E} A_p \Delta p \right|, \quad (32)$$

*) Dla prawidłowo skonstruowanych turbin odkształcenia nie powinny limitować prędkości nagrzewania. Gdy naprężenia są mniejsze od dopuszczalnych, to również odkształcenia, a w szczególności wydłużenia nie powinny przekraczać wartości dopuszczalnych wynikających z luzów konstrukcyjnych. Dla takiego założenia kryterium (1) można zastąpić warunkiem (29).

$\Delta T_{red, dop}$ – dopuszczalna wartość zredukowanej różnicy temperatur

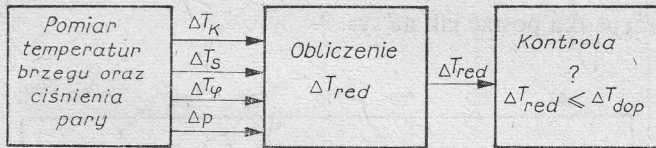
$$\Delta T_{red, dop} = \frac{2(1-\nu)}{\beta E} \sigma_{dop} \quad (33)$$

Z ostatniej zależności wynika, że $\Delta T_{red, dop}$ zależy jedynie od własności materiałów. Ponieważ własności materiału zależą od temperatury pracy istnieje zależność

$$\Delta T_{red, dop} = f(T). \quad (34)$$

Przykładowo, na rys. 7 przedstawiono tę zależność dla kadłuba wewnętrznego i zewnętrznego części wysokoprężnej turbiny upustowo-kondensacyjnej [18]. Kadłub wewnętrzny wykonany jest ze staliwa L21HMF, a zewnętrzny – L20HM.

Napężenie dopuszczalne określa się na podstawie granicy plastyczności. Zwykle przyjmuje się, że napężenia całkowite nie powinny przekroczyć tej granicy [3, 7, 20].



Rys. 8. Ocena obciążeń cieplnych turbiny według dopuszczalnej zredukowanej różnicy temperatur (fragment „A” w schemacie na rys. 1)

Czasem stosuje się współczynnik zapasu rzędu $0,7 \div 0,8$ ze względu na nierównomierność własności wytrzymałościowych odlewu, tolerancję pomiarową itp. W obliczeniach $\Delta T_{red, dop}$ przyjęto $\sigma_{dop} = R_{pl}$.

Dla oceny obciążeń cieplnych turbiny według dopuszczalnej zredukowanej różnicy temperatur fragment „A” w schemacie blokowym (rys. 1 i 3) przedstawia rys. 8.

W omawianym wariancie oceny obciążeń stałej rejestracji podlegają różnice temperatur na grubości kołnierza ΔT_k , ścianki ΔT_s , w kierunku obwodowym ΔT_ϕ oraz ciśnienie pary w analizowanym przekroju.

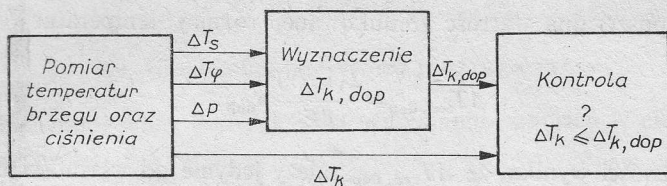
Do układu pomiarowego potrzebny jest przetwornik, który realizuje dwie funkcje:

- przetwarza różnice temperatur ΔT_k , ΔT_s , ΔT_ϕ oraz różnicę ciśnień Δp na ΔT_{red} według zależności (32),
- sygnalizuje przekroczenie dopuszczalnej różnicy temperatur nastawianej uprzednio na skali przetwornika.

5.4. Dopuszczalna różnica temperatur na grubości kołnierza

Ocenę obciążeń cieplnych turbin opartych na dwuwymiarowych kryteriach temperaturowych można również realizować w inny sposób. Można np. prowadzić kontrolę różnicy temperatur na grubości kołnierza i wtedy musi być spełniona nierówność

$$\Delta T_k \leq \Delta T_{k, dop} \quad (35)$$

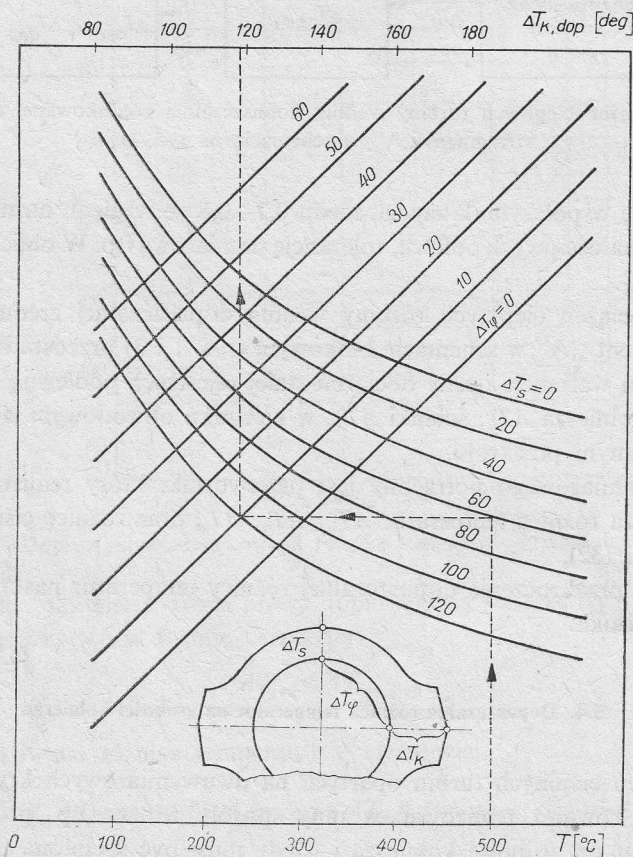


Rys. 9. Ocena obciążeń cieplnych turbiny według dopuszczalnej różnicy temperatur na grubości kołnierza (fragment „A” w schemacie na rys. 1)

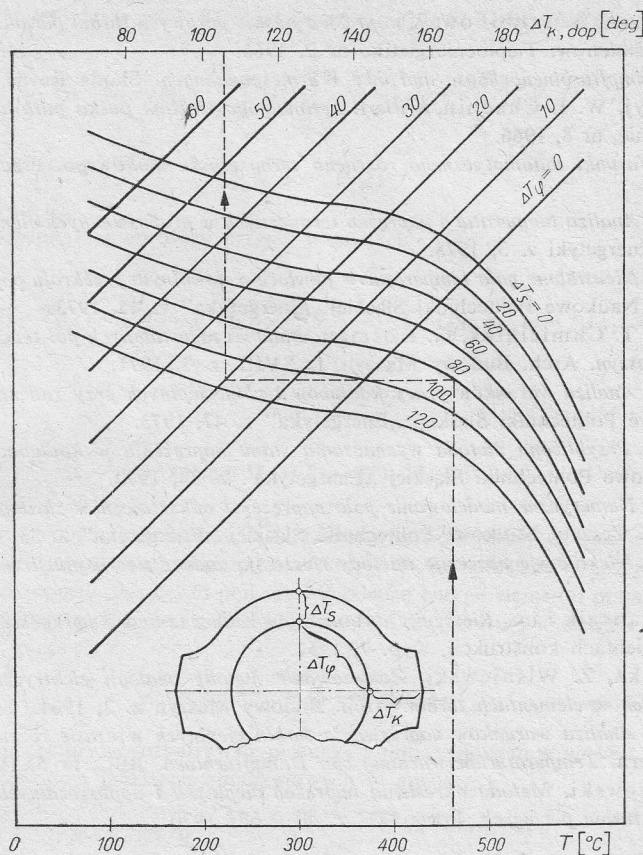
Dopuszczalną różnicę temperatur na grubości kołnierza określa, na mocy zależności (27) i (29), równanie

$$\max_D \left| \frac{\beta E}{2(1-\nu)} [\Delta T_{k, \text{dop}} A_k(w, \varphi) + \Delta T_s A_s(w, \varphi) + \Delta T_\varphi A_\varphi(w, \varphi)] + \Delta p A_p \right| = \sigma_{\text{dop}}. \quad (36)$$

Fragment „A” w schemacie blokowym kontroli obciążeń cieplnych (rys. 1 i 3) przyjmuje w omawianym przypadku postać jak na rys. 9.



Rys. 10. Dopuszczalna różnica temperatur na grubości kołnierza kadłuba wewnętrznej części WP turbiny



Rys. 11. Dopuszczalna różnica temperatur na grubości kołnierza kadłuba zewnętrznego części WP turbiny

Z zależności (36) wynika, że $\Delta T_{k,dop}$ zależy dla danego kadłuba od średniej temperatury pracy, różnic temperatur ΔT_s i ΔT_ϕ oraz różnicy ciśnienia Δp . Istnieje więc zależność

$$\Delta T_{k,dop} = f(T, \Delta T_s, \Delta T_\phi, \Delta p). \quad (37)$$

Przykładowo, na rys. 10 i 11 przedstawiono tę zależność dla kadłuba wewnętrznego i zewnętrznego części wysokoprężnej turbiny upustowo-kondensacyjnej [18]. W obliczeniach pominięto obciążenia mechaniczne wywołane różnicą ciśnienia pary Δp .

Praca wpłynęła do Redakcji w kwietniu 1976 r.

Literatura

- [1] S. Wiśniewski, *Obciążenia cieplne silników tłokowych*, WKiŁ, Warszawa 1972.
- [2] T. Chmielniak, G. Kosman, *Investigation of turbine heating from the viewpoint of automatic starting control*. Prace IMP z. 70 - 72, 1976.
- [3] G. Pahl, W. Reitze, M. Salm, *Überwachungseinrichtung für Zulässige Temperaturänderungen bei Dampfturbinen*. Brown Boveri Mitteilungen, 51, nr 3, 1964.
- [4] A. Krawet, *Opracowanie praktycznych metod określenia stanu naprężeń w wytypowanych elementach bloku energetycznego w zmiennych warunkach pracy*. Praca ZPBE „Energopomiar”, Gliwice 1975.

- [5] E. R. Płotkin, A. A. Trubikow, *K woprosu o puskie parowych turbin parom nominalnych i skol-ziaszczich paramietrow*. Tieploeniergetika nr 9, 1963.
- [6] J. Marik, *Dampfturbinengehäuse und ihre Wärmespannungen*. Škoda Revue nr 1, 1971.
- [7] I. T. Bespałyj, W. I. Chachin, *Kritierii optimalnogo riežima paska parowej turbiny*. Energo-maszinoostrojenie, nr 8, 1966.
- [8] E. Góral, *Warunki automatycznego rozruchu turbozespolu blokowego*. Praca doktorska, Łódź 1967.
- [9] G. Kosman, *Analiza temperatur i naprężeń termicznych w grubościennych elementach turbin ciep-lynych*. Arch. Energetyki z. 3, 1975.
- [10] G. Kosman, *Nieustalone pola temperatur w powloce o dowolnym przekroju poprzecznym i podłuż-ny*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej „Energetyka” z. 45, 1973.
- [11] K. Kutarba, T. Chmielniak, G. Kosman, *Badania nieustalonych pól temperatur w złożonych elementach maszyn*. Arch. Budowy Maszyn, t. XVIII, z. 3, 1971.
- [12] G. Kosman, *Analiza warunków pracy kadłubów turbin ciepłych przy zmiennym obciążeniu*. Ze-szyty Naukowe Politechniki Śląskiej „Energetyka” z. 47, 1973.
- [13] G. Kosman, *Przybliżona metoda wyznaczania stanu naprężeń w kadłubach turbin ciepłych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej „Energetyka” z. 34, 1970.
- [14] G. Kosman, *Numeryczne modelowanie pola naprężeń i odkształceń w złożonych elementach ma-szyn ciepłych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej „Energetyka” z. 53, 1975.
- [15] J. A. Birger, *Niekotoryje obszczije metody rieszenija zadacz teorii plasticznosti*. PMM, t. XV, wyp. 6, 1951.
- [16] A. W. Ameljanczik i in., *Rieszenije dwumiernych zadacz iz teorii uprugosti*. Tiepłowyje napria-żenija w elementach konstrukcii, wyp. 7, 1967.
- [17] A. Tarczyńska, Z. Wiśniewski, *Zastosowanie metody analogii elektrycznej do badania pól temperaturowych w elementach turbin*. Arch. Budowy Maszyn z. 2, 1964.
- [18] G. Kosman, *Analiza warunków nagrzewania turbin ciepłych w czasie rozruchu*. Gliwice 1973.
- [19] H. Linnemann, *Temperaturüberwachung von Dampfturbinen*. BBC, nr 5, 1968.
- [20] W. Grzegorzewski, *Metoda określenia naprężeń ciepłych i dopuszczalnych różnic temperatur w elementach turbin parowych*. Prace ITC z. 40, Łódź 1970.

Załącznik Nr 1

Opis bloku modelowania procesu nagrzewania grubościennych elementów turbin

Wariant I (c_{sr} , ρ_{sr} , λ_{sr}^*)

N -te przybliżenie pola temperatur w badanym elemencie można opisać formułą [9]

$$T_n(\vec{x}, t) = V_0(\vec{x}, t) + \sum_{i=1}^n A_i(t) V_i(\vec{x}), \quad (Z.1)$$

gdzie V_i — funkcje liniowo niezależne przedstawiające układ zupełny, przy czym V_0 spełnia niejedno-rodne warunki (4), a V_i ($i \geq 1$) warunki jednorodne.

Funkcje $A_i(t)$ określa wyrażenie

$$A_i(t) = \sum_{j=1}^n \left[-b_{ij}^* b'_{0j}(t) + \sum_{v=1}^n \left(\frac{d|B|}{ds} \right)^{-1} \Big|_{s=s_v} \left\{ c_j B_{ij}(s_v) e^{s_v t} - \int_0^t [B_{ij}(s_v) b'_{0j}(\tau) + \right. \right. \\ \left. \left. + B_{ij}^*(s_v) b'_{0j}(\tau)] e^{s_v(t-\tau)} d\tau \right\} \right], \quad (Z.2)$$

gdzie B_{ij} — dopełnienie algebraiczne elementu b_{ij} macierzy $[B]$, s_v — pojedyncze miejsca zerowe.

wyznacznika $|B|$. Elementy b_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) macierzy $[B]$ oraz funkcje $b_{0j}(t)$ są określone następująco:

$$b_{ij} = b'_{ij} + s b''_{ij} = \frac{\lambda^*}{c\rho} \int_V \left(\sum_i \frac{\partial V_i}{\partial x_i} \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) dV + s \int_V V_i V_j dV. \quad (Z.3)$$

Stałe c_j są równe

$$c_j = \int_V T_0 V_j dV. \quad (Z.4)$$

Funkcje współrzędne V_i najprościej przyjąć w postaci:

— dla $i=0$

$$V_0(\vec{x}, t) = T_a(x_1, x_2, t) + \frac{x_3 - f_a(x_1, x_2)}{f_b(x_1, x_2) - f_a(x_1, x_2)} [T_b(x_1, x_2, t) - T_a(x_1, x_2, t)], \quad (Z.5)$$

— dla $i \geq 1$

$$V_i(\vec{x}) = x_3^i [f_a(x_1, x_2) - x_3] [f_b(x_1, x_2) - x_3]. \quad (Z.6)$$

Wariant II $[c(T), \rho(T), \lambda^*(T)]$

Obszar ograniczony powierzchniami A_a i A_b dzielimy na podobszary za pomocą siatki dowolnej, dostosowanej do kształtu zewnętrznej powierzchni ciała (rys. 4). Temperatury wyznaczane będą w punktach położonych na przecięciu płaszczyzn podziału. Z bilansu energii elementu przestrzennego, otaczającego punkt obliczeniowy otrzymuje się formułę opisującą temperaturę w czasie $t + \Delta t$ na podstawie wartości temperatur w czasie t

$$T_{t+\Delta t} = B T + \sum_m B_{m \pm \Delta m} T_{m \pm \Delta m}, \quad (Z.7)$$

gdzie $T, T_{t+\Delta t}$ — temperatury w rozpatrywanym punkcie obliczeniowym w czasie t i $t + \Delta t$, $T_{m \pm \Delta m}$ — temperatury w sąsiednich punktach obliczeniowych w czasie t ,

$$B = 1 - \sum_m B_{m \pm \Delta m}, \quad B_{m \pm \Delta m} = \frac{\lambda^*(T) \Delta t A_{m \pm \Delta m}}{c(T) \rho(T) \Delta V \Delta l_m}. \quad (Z.8)$$

Wielkość kroku czasowego Δt musi być mniejsza od wartości maksymalnie dopuszczalnej, którą wyznaczyć można z warunku

$$B = 0. \quad (Z.9)$$

Jeżeli podziału na elementarne wielościany dokonuje się za pomocą płaszczyzn ortogonalnego układu współrzędnych krzywoliniowych ξ, η, ζ o współczynnikach Lamego H_ξ, H_η, H_ζ , to np. pierwsza z zależności (Z.8) przyjmuje postać

$$B_{\xi \pm \Delta \xi} = \frac{\lambda^*(T) \Delta t}{c(T) \rho(T)} \frac{H_\eta \left(\xi \pm \frac{\Delta \xi}{2} \right) H_\zeta \left(\xi \pm \frac{\Delta \xi}{2} \right)}{H_\eta^2 H_\eta H_\zeta \Delta \xi^2}. \quad (Z.10)$$

Załącznik Nr 2

Opis bloku modelowania pola przemieszczeń i naprężeń w elementach turbin

Wariant I $(\mu_{sr}, \lambda_{sr}, \gamma_{sr})$

N -te przybliżenie pola przemieszczeń w badanym elemencie można przedstawić w postaci [12]

$$\vec{u}_n(\vec{x}) = \vec{Y}_0(\vec{x}) + \sum_{k=1}^n d_k \vec{Y}_k(\vec{x}), \quad (Z.11)$$

gdzie $\vec{Y}_k(\vec{x})$ – funkcje wektorowe liniowo niezależne, przedstawiające układ zupełny i spełniające warunki (8) i (9). Stałe d_k są rozwiązaniem układu równań

$$\sum_{k=1}^n g_{kl} d_k = h_l \quad (l=1, 2, \dots, n), \quad (\text{Z.12})$$

gdzie

$$g_{kl} = \int_V \left[\frac{\mu}{2} \sum_{i,j} \left(\frac{\partial Y_{li}}{\partial x_j} + \frac{\partial Y_{lj}}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial Y_{kl}}{\partial x_j} + \frac{\partial Y_{kj}}{\partial x_i} \right) + \lambda \sum_i \frac{\partial Y_{li}}{\partial x_i} \sum_i \frac{\partial Y_{kl}}{\partial x_i} \right] dV, \quad (i=1, 2, 3) \quad (\text{Z.13})$$

$$h_l = (\gamma T - p) \int_A \sum_i Y_{li} \cos(n, x_i) dA - \gamma \int_V \sum_i Y_{li} \frac{\partial T}{\partial x_i} dV - g_{0l}.$$

Warunek (9) jest pobocznym warunkiem brzegowym badanego zagadnienia. W związku z tym rozwiązania (Z.11) można szukać w szerszym zbiorze funkcji $\vec{Y}_k$ spełniających tylko zasadniczy warunek brzegowy (8).

Składowe stanu naprężenia można wyznaczyć z uogólnionego prawa Hooke'a. Po uwzględnieniu (Z.11) mamy

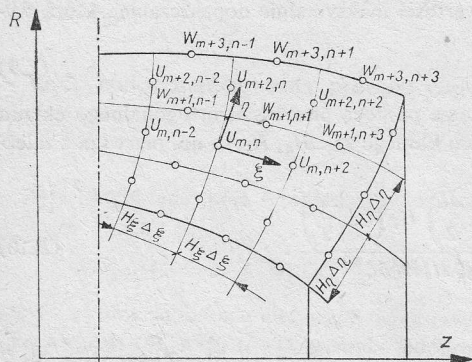
$$\sigma_{ij n} = \sigma_{ij 0} + \sum_{k=1}^n d_k \sigma_{ijk} - \gamma T \delta_{ij} \quad (i, j=1, 2, 3), \quad (\text{Z.14})$$

gdzie

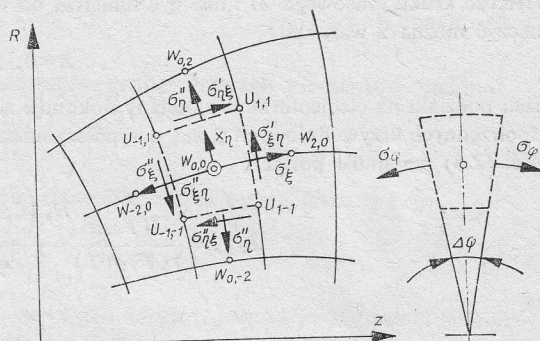
$$\sigma_{ijk} = \mu \left(\frac{\partial Y_{ki}}{\partial x_j} + \frac{\partial Y_{kj}}{\partial x_i} \right) + \lambda \delta_{ij} \sum_i \frac{\partial Y_{ki}}{\partial x_i} \quad (k=0, 1, 2, \dots, n).$$

Wariant II $[\mu(T), \lambda(T), \gamma(T)]$

Badany element podzielić należy na podobszary za pomocą współrzędnych krzywoliniowych o powierzchniach odpowiadających kształtom bryły. Przykładowo, element turbiny w kształcie powłoki obrotowej (rys. Z.1) dzielimy na elementarne wielościanny za pomocą



Rys. Z.1. Podział dowolnej powłoki obrotowej na elementarne wielościanny



Rys. Z.2. Punkt obliczeniowy wewnętrzny

- płaszczyzn południkowych przechodzących przez oś powłoki $\varphi = \text{const}$,
- powierzchni $\xi = \text{const}$ oraz $\eta = \text{const}$

$$\xi_m = \xi_0 + m \Delta \xi$$

$$(m, n=0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

$$\eta_m = \eta_0 + n \Delta \eta$$

Rozpatrywane zagadnienie sprowadza się do wyznaczenia przemieszczeń w punktach obliczeniowych $U_{m,n}$ w kierunku osi ζ oraz w punktach $W_{m,n}$ w kierunku osi η .

Z równania równowagi elementarnego wielościanu otaczającego dowolny punkt obliczeniowy otrzymujemy zależność pomiędzy przemieszczeniami w punktach sąsiednich. Dla punktu wewnętrznego (rys. Z.2) równanie to zapisane dla kierunku η przyjmuje postać

$$p'_\eta - p''_\eta - p_\xi - p_\varphi + p_{\eta\xi} + p'_{\xi\eta} - p'_{\xi\eta} + P_\eta = 0. \quad (Z.15)$$

Wyrażając poszczególne siły za pomocą naprężeń, a te z kolei za pomocą przemieszczeń otrzymujemy

$$\begin{aligned} & [D_3 + E_3(1, 0)] W_{2,0} + [-D_3 + E_4(-1, 0)] W_{-2,0} + [A_1(0, 1) - C_3] W_{0,2} + [A_2(0, -1) + C_3] W_{0,-2} + \\ & - [A_2(0, 1) + A_1(0, -1) + C_4 + D_4 + E_4(1, 0) + E_3(-1, 0)] W_{0,0} + \\ & + [A_3(0, 1) - C_1 + D_1 + E_1(1, 0)] U_{1,1} - [A_4(0, 1) - C_2 - D_1 - E_1(-1, 0)] U_{-1,1} + \\ & + [A_4(0, -1) + C_2 - D_2 + E_2(-1, 0)] U_{-1,-1} + [A_3(0, -1) + C_1 + D_2 + E_2(1, 0)] U_{1,-1} + \\ & + P_\eta - F_1(T_{0,1} - T_{0,-1}) = 0, \end{aligned} \quad (Z.16)$$

gdzie np. współczynnik D_3 jest równy

$$D_3 = \frac{\mu H_\varphi}{2H_\xi} [H_\eta(1, 0) - H_\eta(-1, 0)] \frac{\Delta\eta}{\Delta\xi}. \quad (Z.17)$$

Wartości współczynników Lamego w badanym punkcie ($m=0$ i $n=0$) podano bez dodatkowych oznaczeń, tzn. $H_i = H_i(0, 0)$ dla $i=\xi, \eta, \varphi$. W podobny sposób można przedstawić pozostałe współczynniki.

Komplet równań równowagi wraz ze wszystkimi współczynnikami dla zagadnień osiowo-symetrycznych podano w [13], natomiast dla zagadnień płaskich w [14].

Критерии оценки тепловой нагрузки паровых турбин в эксплуатационных условиях

Резюме

В работе представлена проблема контроля тепловой нагрузки паровых турбин в различных условиях работы. Обсуждаются методы моделирования температурных полей и нагрузки в турбинных элементах на основе экспериментально определенной краевой температуры. Представлен обобщенный алгоритм оценки тепловой нагрузки на основе непрерывной регистрации температуры в характеристических точках. Представлены температурные критерии оценки тепловой нагрузки. Общее решение представлено для трехразмерной модели нагрева толстостенных турбинных элементов. Подробные рассуждения проводились для двумерной модели нагрева корпуса.

Criteria for Evaluation of Thermal Loads of Steam Turbines in Field Conditions

Summary

The problem of control of thermal loads of steam turbines in various operating conditions has been presented in the paper. Methods of modeling temperature and stress distributions in turbine components based on experimental values of surface temperature have been discussed. A generalized algorithm allowing for the evaluation of thermal loads basing on continuous temperature recording in characteristic points has been given. Temperature criteria for thermal loads evaluation have been presented. The general solution concerns a three-dimensional model of heating turbine components with thick walls. A detailed discussion has been presented for a two-dimensional model of casing heating.