

Maciej ROSKOSZ

Politechnika Śląska, Gliwice

## MODELOWANIE STANÓW CIEPLNYCH ELEMENTÓW TURBIN DLA POTRZEB SYSTEMU NADZORU DIAGNOSTYCZNEGO

**Streszczenie.** Przedstawiono założenia modeli obliczeniowych pól temperatury zaworów, kadłubów oraz wirnika turbiny parowej dla potrzeb systemu nadzoru diagnostycznego. Na tej podstawie opracowano procedury obliczeniowe do analizy w trybie „on-line” stanu termicznego wymienionych elementów. Na przykładzie zaworu przedstawiono proces tworzenia i weryfikacji modelu obliczeniowego.

## MODELLING OF THERMAL STATES OF TURBINE COMPONENTS FOR DIAGNOSTIC SUPERVISION SYSTEM

**Summary.** Assumptions of computational models of temperature field of the valves, cylinders and the rotor of the steam turbine for diagnostic supervision system are discussed in this paper. On the basis of these models there are given numeric procedures analysing on-line thermal state of the components listed above. Using the valve as an example this paper presents also the process of forming and verifying of the computational model.

### 1. WSTĘP

Przedstawione zagadnienia są fragmentem prac badawczych, zmierzających do opracowania modeli ciepło - wytrzymałościowych głównych elementów turbiny dla potrzeb systemu ciągłego nadzoru diagnostycznego tych maszyn. Wyniki tych prac służą do opracowania procedur obliczeniowych, które współpracując z układem pomiarowym turbiny pozwolą na bieżące diagnozowanie stanu cieplnego i wytrzymałościowego elementów turbozespołu.

Zgodnie z przyjętymi założeniami zakres modelowania obejmuje:

- kadłuby wewnętrzne i zewnętrzne,
- zawory,
- wirnik.

Zawory i kadłuby należą do najbardziej obciążonych grubościennych elementów turbozespołu. Obciążone są mechanicznie (ciśnieniem) oraz cieplnie (temperaturą przepływającej pary). W wirniku występuje dodatkowo obciążenie mechaniczne wywołane wirowaniem.

Celem modelowania jest określenie w trybie on-line pola temperatury w wymienionych elementach. Znając rozkład temperatury przystąpić można do analizy stanu wytrzymałościowego elementu, określenia rozkładu odkształceń i naprężeń oraz wartości naprężenia maksymalnego. Możliwe jest badanie stanu odkształcenia termicznego, co w przypadku kadłubów i wirnika przy przyjęciu modelu wzajemnej współpracy elementów (określenie punktów stałych) umożliwia analizę osiowych wydłużeń bezwzględnych i względnych turbiny. Istotne jest, by przyjmowane modele umożliwiały opracowanie procedur o krótkim czasie obliczeń, nadających się do pracy w trybie on-line. Ten tryb pracy narzuca pewne wymogi i ograniczenia. Do najważniejszych należy dążenie do minimalizacji czasu obliczeń.

Modelowanie pola temperatury w każdym z wybranych elementów wymaga znajomości zarówno podstawowych wielkości określających pracę turbiny (parametry pary świeżej i wtórnej, moc, obroty), jak również wyników pomiarów dokonywanych w obrębie danego elementu (temperatura pary, metalu). Jako dane niezbędne do wykonania obliczeń przyjęto dostępny zbiór punktów pomiarowych turbiny. Im większa jest liczba informacji (pomiarów) związanych z elementem, tym łatwiej stworzyć, a co najistotniejsze zweryfikować przyjęty model obliczeniowy.

Przykładowo, proces modelowania pola temperatury w kadłubie wygląda następująco:

- a) przyjęcie (wybór) danych do obliczeń (punkty pomiaru parametrów pary w obrębie układu przepływowego, punkty pomiaru temperatury metalu elementu, moc turbozespołu),
- b) wyznaczenie linii ekspansji pary w układzie przepływowym,
- c) określenie współczynników wnikania ciepła  $\alpha$  dla charakterystycznych powierzchni elementu,
- d) rozwiązanie zagadnienia przepływu ciepła.

Jak widać na podstawie przedstawionego algorytmu dostępne pomiary parametrów pary nie dostarczają pełnych informacji o parametrach czynnika omywającego wybrany element - kadłub. Konieczne jest rozwiązanie zagadnienia rozprężania pary w układzie przepływowym.

Elementem, w którym modelowanie pola temperatury nie wymaga rozwiązywania zadania ekspansji, jest zawór turbiny. W tym przypadku pomiar parametrów pary w komorze zaworu dostarcza pełnej informacji o czynniku omywającym element. Zawór jest elementem, na którym dokonanie pomiaru temperatury metalu jest technicznie możliwe. Pomiaru takie wykonywane są na zdecydowanej większości turbozespołów dużej mocy.

Możliwość porównania wyników obliczeń z danymi pomiarowymi oraz dysponowanie kompletem danych potrzebnych do obliczeń zdecydowała o wyborze zaworu jako przykładowego przedmiotu modelowania.

## 2. ZAŁOŻENIA MODELU OBLICZENIOWEGO

Celem obliczeń jest wyznaczenie rozkładu pola temperatury w elemencie na podstawie dostępnych parametrów pary lub parametrów pary i temperatury metalu rozpatrywanego elementu.

Przyjęto następujące założenia:

- dwuwymiarowy model geometryczny (np. osiowosymetryczny),
- geometrię elementu opisuje siatka podziału różnicowego opracowana na podstawie dokumentacji konstrukcyjnej,
- własności fizyczne materiału elementu są stałe i niezależne od temperatury,
- temperatura początkowa elementu w danym cyklu obliczeń wyznaczana jest na podstawie analizy krzywych stygnięcia lub na podstawie bezpośredniego pomiaru początkowej temperatury metalu elementu przed rozruchem,
- temperatura czynnika to albo mierzona temperatura pary, albo wynik modelowania ekspansji pary w układzie przepływowym turbiny,
- współczynniki wnikania ciepła dla charakterystycznych powierzchni elementu opisują funkcje postaci  $\mathbf{Nu} = \mathbf{f}(\mathbf{Re})$  lub funkcje typu  $\alpha = \mathbf{f}(\mathbf{N}_{gr})$ .

Przedstawione założenia są słuszne dla wszystkich modelowanych elementów turbiny. Jako metodę rozwiązania prostego (bezpośredniego) zagadnienia przepływu ciepła wybrano metodę bilansów elementarnych oraz metodę elementów skończonych. Zastosowano dwie metody obliczeniowe, by istniała możliwość porównywania wyników otrzymanych dla geometrii uproszczonej - metoda bilansów elementarnych oraz dla dokładnego odwzorowania postaci konstrukcyjnej elementu - metoda elementów skończonych. Ze względu na długi czas

obliczeń przy zastosowaniu metody elementów skończonych do opracowania procedur przeznaczonych do pracy w trybie on-line wykorzystano metodę bilansów elementarnych. Umożliwia ona opracowanie procedur numerycznych o krótkim czasie obliczeń.

Ponadto, dla celów analizy wydłużeń cieplnych kadłubów i wirnika wykorzystano zagadnienie określenia średniocałkowej temperatury elementu w kształcie bryły obrotowej o dowolnym kształcie.

### 3. ANALIZA MOŻLIWOŚCI OKREŚLENIA INTENSYWNOŚCI WYMIANY CIEPŁA

Podstawowym procesem fizycznym decydującym o intensywności przepływu ciepła między parą wodną a elementami turbiny jest konwekcja wymuszona i swobodna. Przy wyznaczeniu współczynników wymiany ciepła  $\alpha$  w Systemie Nadzoru Diagnostycznego należy uwzględnić następujące fakty:

- współczynniki wymiany ciepła  $\alpha$  należy wyznaczać w sposób ciągły na podstawie pomiarów wybranych wielkości,
- System Nadzoru Diagnostycznego obejmuje łącznie 10 elementów ( zawory odcinające - prawy i lewy, kadłub wewnętrzny i zewnętrzny oraz wirnik - dla części WP i SP turbiny).

Powyższe fakty powodują, że formuły obliczeniowe współczynników wymiany ciepła  $\alpha$  w Systemie Nadzoru Diagnostycznego powinny charakteryzować się możliwie krótkim czasem obliczeń.

Uwzględniając dostępne możliwości i narzucone ograniczenia do szczegółowych analiz wybrano 4 sposoby wyznaczania współczynników wymiany ciepła  $\alpha$ .

#### Metoda 1

Ogólną formułę opisującą liczbę Nusselta dla stanów ustalonych procesu przepływu ciepła postaci

$$\text{Nu} = C(\bar{r})\text{Re}^n \text{Gr}^m \text{Pr}^s \quad (1)$$

można, jak wynika z doświadczeń, zastosować do wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  dla stanów nieustalonych [1]. Stałe, występujące w tej zależności, określa się opracowując odpowiednio wyniki badań modelowych dla wybranych charakterystycznych powierzchni poszczególnych elementów. Wyniki takich badań dostępne są w literaturze [1,3,5].

## Metoda 2

Inną metodą opisującą współczynnik  $\alpha$  dla wybranej powierzchni konkretnego elementu jest funkcja uzależniająca współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  wprost od obciążenia maszyny

$$\alpha = C + A \left( \frac{n}{n_0} \right)^a + B \left( \frac{N}{N_0} \right)^b, \quad (2)$$

gdzie stałe występujące w równaniu również określane są empirycznie, a  $n_0, N_0$  to nominalna ilość obrotów i moc nominalna [5].

## Metoda 3

Najlepszym sposobem wyznaczenia współczynników wnikania ciepła  $\alpha$  jest ciągle rozwiązywanie odwrotnych zagadnień przepływu ciepła. W zagadnieniach odwrotnych określane są warunki brzegowe na podstawie czasowych przebiegów temperatury, zmierzonych w wybranych punktach wewnątrz elementu. Na podstawie pomiaru temperatury w wewnętrznych punktach ciała wyznaczany jest rozkład temperatury lub gęstość strumienia ciepła na powierzchni ciała. Znając temperaturę czynnika otaczającego ciało można określić współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$  [2].

## Metoda 4

Metoda ta jest wariantem metody 3. Dysponujemy pomierzonymi przebiegami czasowymi temperatury w wewnętrznych punktach ciała oraz płynu omywającego rozpatrywany element. Szukamy funkcji uzależniających wartość współczynnika  $\alpha$  od wybranych wielkości związanych bezpośrednio (np. prędkość, ciśnienie) lub pośrednio (np. moc, obroty turbiny) z parametrami płynu. Wyznaczenie współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  odbywa się w sposób iteracyjny poprzez rozwiązywanie zagadnienia przepływu ciepła dla różnych jego wartości.

## 4. OKREŚLENIE INTENSYWNOŚCI WYMIANY CIEPŁA DLA ZAWORU

Przy tworzeniu modelu zaworu odcinającego turbiny dużej mocy współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$  wyznaczony zostanie z dostępnych w publikacjach formuł typu (1) (metoda 1) oraz obliczony na podstawie dostępnych danych pomiarowych (metoda 4). Pomimo jej dokładności zrezygnowano z metody 3, opartej na ciągłym rozwiązywaniu odwrotnych zagadnień

przepływu ciepła z uwagi na ograniczenia czasowe, wynikające z zakładanego trybu pracy on-line.

Rozwijając metodę 4 przyjęto następujące uproszczenia dotyczące wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$ :

- szukamy wartości uśrednionej dla całej powierzchni wewnętrznej komory zaworu,
- zakładamy, że wartość współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  zależy głównie od obciążenia turbozespołu (strumienia przepływającej pary lub mocy)

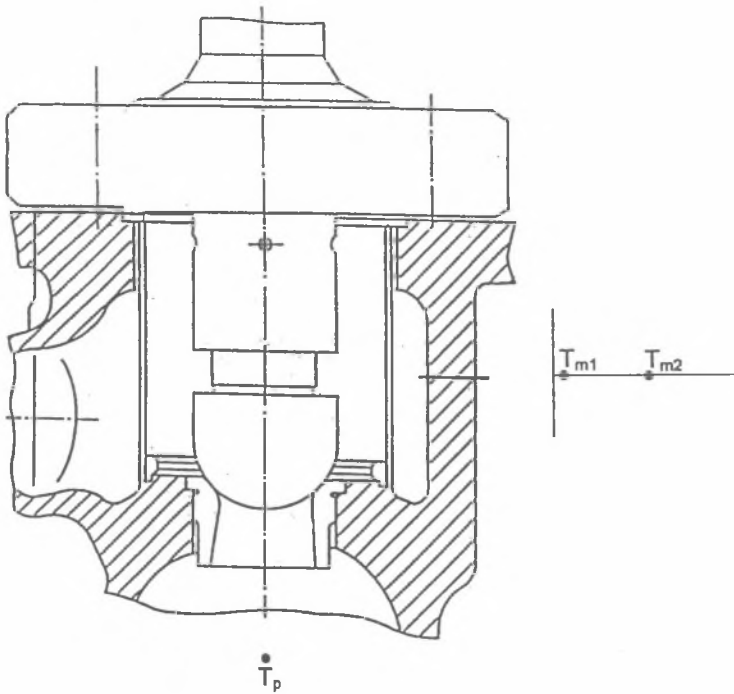
$$\alpha = f(\dot{m}), \quad \alpha = f(N_{el}) \quad (3)$$

Dysponowano następującymi danymi pomiarowymi (rys.1):

- temperatura pary w komorze zaworu,
- dwa punkty pomiaru temperatury metalu ścianki zaworu,
- główne parametry określające pracę turbozespołu (moc, obroty,...).

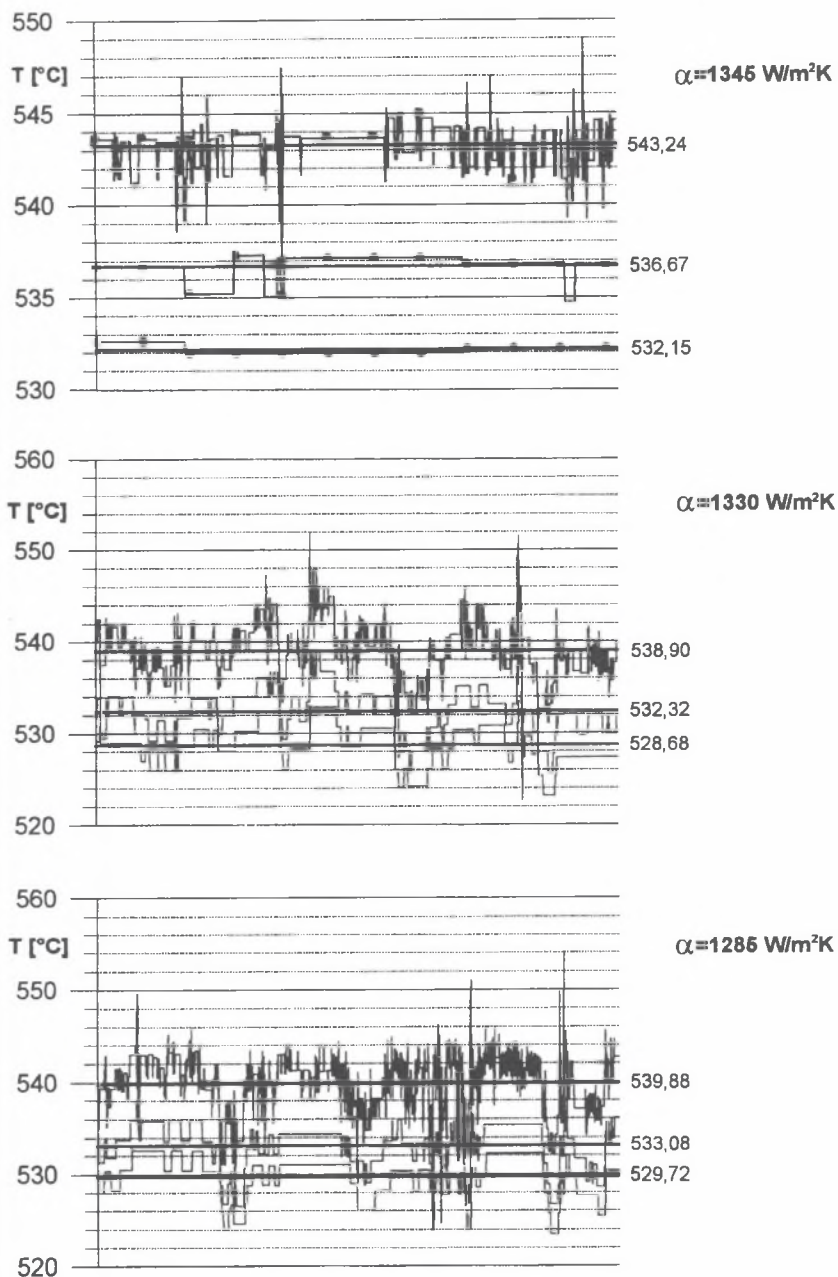
Dane z układu pomiarowego turbozespołu opisywały różne stany eksploatacyjne maszyny. w tym również najbardziej interesujące stany nieustalone (rozruch, zmiana mocy). Zgromadzono zapisy czasowych przebiegów ww. danych dla kilkudziesięciu rozruchów z kilku turbin dużej mocy, zainstalowanych w elektrowniach.

Przy takim zestawie danych pomiarowych najprostszym sposobem znalezienia współczynnika  $\alpha$  wydaje się być rozwiązanie bezpośredniego (prostego) zagadnienia przepływu ciepła. W rozpatrywanym przypadku znamy temperaturę czynnika omywającego ściankę elementu - wymuszenie oraz odpowiedź układu (elementu) na to wymuszenie - dwa punkty pomiaru temperatury metalu na grubości ścianki elementu. Przy znanym warunku początkowym (rozkład temperatury w ściance) zakładamy warunek brzegowy - wartość współczynnika  $\alpha$ . Obliczamy rozkład temperatury dla zadanych warunków brzegowych, a następnie porównujemy wyniki obliczeń rozkładu temperatury w odpowiednich punktach z danymi pomiarowymi. Zmieniamy współczynnik  $\alpha$  tak długo, aż osiągniemy zadowalającą zgodność wyników obliczeń z pomiarami.



Rys. 1. Dane pomiarowe  
Fig. 1. Measurement data

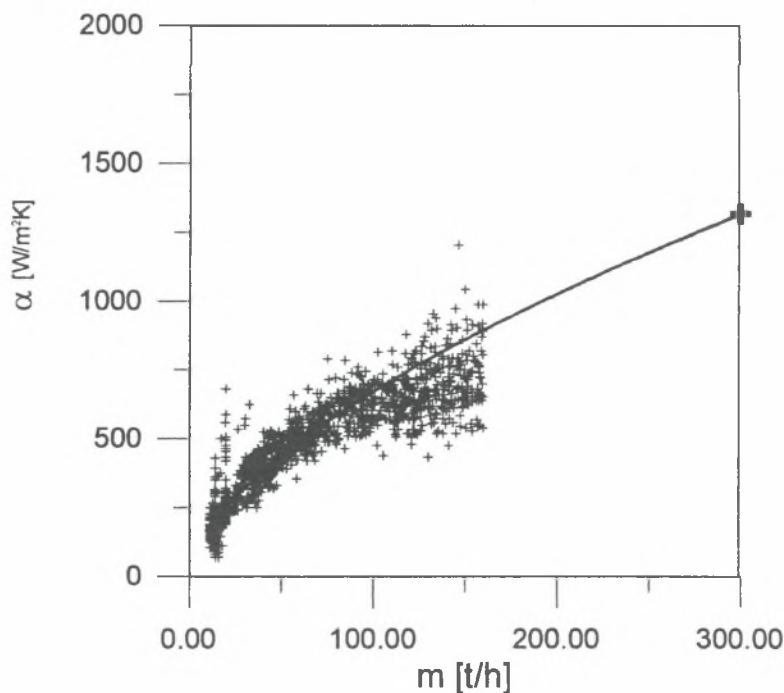
Obliczenia rozpoczęto od określenia wartości współczynnika  $\alpha$  w stanie ustalonym. Rysunek 2 przedstawia wybrane do obliczeń przebiegi czasowe temperatur pary i metalu w stanie ustalonym. Z powodu niewielkich wahań mierzonych wielkości zostały one uśrednione. Dla uśrednionych wielkości szukano wartości współczynnika  $\alpha$ . Wyniki obliczeń zamieszczono na rysunku. Dają one zadowalającą zgodność otrzymanych wartości współczynnika  $\alpha$  dla różnych zestawów danych pomiarowych.



Rys. 2. Wyznaczanie wartości współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  dla stanu ustalonego  
Fig. 2. Evaluating of the heat transfer coefficient  $\alpha$  for the steady conditions



Zależność współczynnika  $\alpha$  od strumienia przepływającej przez zawór pary wyznaczono przeliczając zgromadzone z rozruchów turbin dane. Wyniki zebrano na rys.3. Znając wartość współczynnika wnikania ciepła w stanie ustalonym zależność  $\alpha$  od strumienia pary. aproksymowano funkcją, której przebieg oddaje krzywa przedstawiona na rys 3.



Rys. 3. Wykres zależności współczynnika  $\alpha$  od strumienia pary  
Fig. 3. Dependence of the coefficient  $\alpha$  on the steam jet

## 5. PRZYKŁAD OBLICZEŃ I WERYFIKACJI PRZYJĘTEGO MODELU DLA ZAWORU ODCINAJĄCEGO TURBINY PAROWEJ DUŻEJ MOCY

Opierając się na przyjętych założeniach stworzono modele obliczeniowe pola temperatury w głównych elementach turbin parowych dużej mocy. Opracowane procedury obliczeniowe charakteryzują się krótkim czasem obliczeń i zadowalającą dokładnością określania rozkładu temperatury. Jako przykład zaprezentowana zostanie procedura obliczeniowa dla zaworu odcinającego.

Danymi pomiarowymi koniecznymi do dokonania obliczeń są:

- temperatura pary w komorze zaworu,
- moc, obroty lub strumień pary,
- temperatura metalu w środku grubości ścianki zaworu (temperatura początkowa elementu).

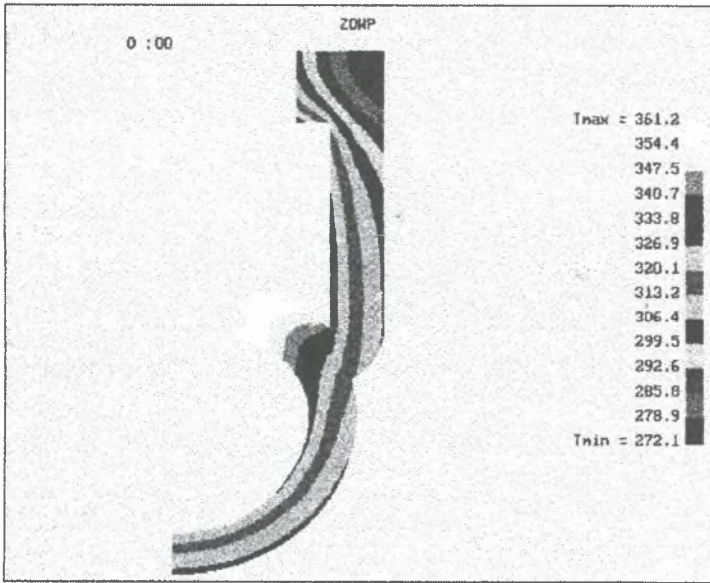
Stworzono kilka procedur obliczeniowych, określających pole temperatury w zaworze. Różnią się one przyjętymi warunkami brzegowymi - sposobem określenia wartości współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$ . Wyniki obliczeń przedstawiono dla wybranych dwóch procedur. Warunki wymiany ciepła na powierzchni wewnętrznej komory zaworu określono dwoma sposobami:

- zależnością typu (1) dla zaworów turbin parowych, w której stałe dobrano na podstawie danych znalezionych w literaturze [3] - procedura 1,
- opisaną wcześniej funkcją postaci  $\alpha = f(\dot{m})$  - procedura 2.

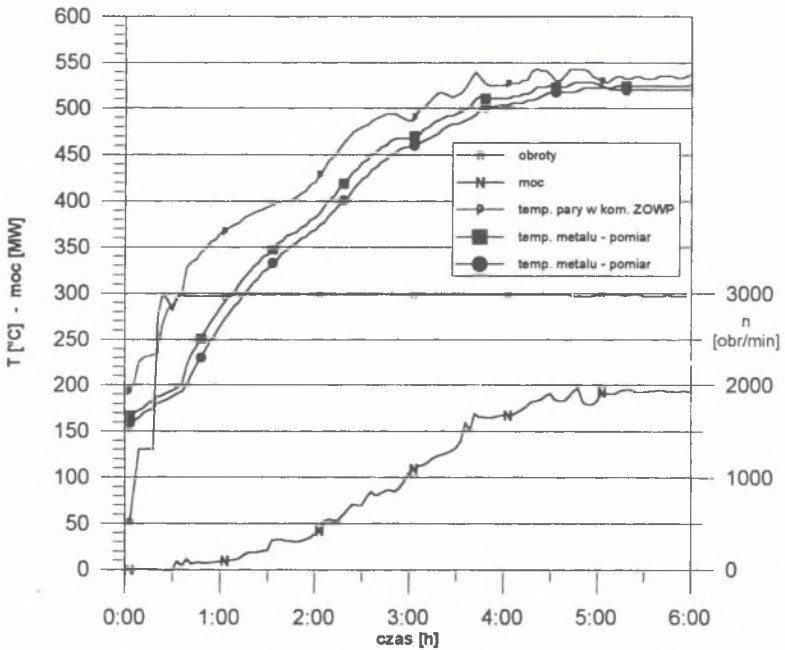
W ten sposób otrzymano dwie procedury różniące się sposobem określenia warunków brzegowych wymiany ciepła. Obliczony rozkład temperatury prezentowany jest w postaci przekroju zaworu z naniesionymi izotermami z odpowiednim opisem (rys.4). Weryfikacja modelu polega na porównaniu przebiegów czasowych wyników modelowania z wartościami zmierzonymi. Przyjęto, że o poprawności modelowania decydować będzie zgodność obliczonej i pomierzonej wartości temperatury, jednakowe wartości jej pochodnej oraz różnic pomiędzy wybranymi punktami elementu. Wybrano te wielkości, gdyż one najlepiej łączą ze sobą pole temperatury i pole naprężeń w elemencie. Na ich podstawie, przy użyciu tak zwanych „funkcji przejścia” postaci

$$\sigma = f\left(\frac{dT}{dt}\right), \quad \sigma = f(\Delta T) \quad (4)$$

określa się wartość naprężenia maksymalnego w elemencie.



Rys. 4. Przekrój zaworu odcinającego z naniesionymi izotermami  
 Fig. 4. Cross-section of the valve with isotherms



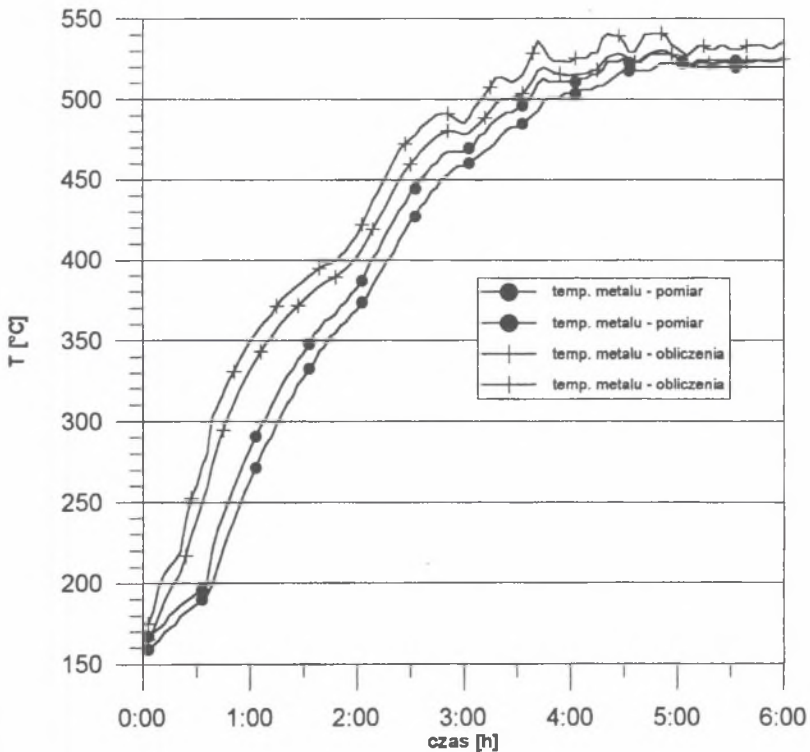
Rys. 5. Przebiegi czasowe danych do obliczeń  
 Fig. 5. Time variations of the computational data

Dane pomiarowe, dla których przeprowadzono obliczenia, to przebiegi czasowe następujących wielkości (rys.5):

- obroty,
- moc,
- temperatura pary w komorze zaworu,
- temperatura metalu ścianki zaworu - pomiar głęboki,
- temperatura metalu ścianki zaworu - pomiar w środku ścianki.

Wykorzystano obie procedury obliczeniowe. Porównanie wartości zmierzonych z obliczeniami przedstawiono na rysunkach:

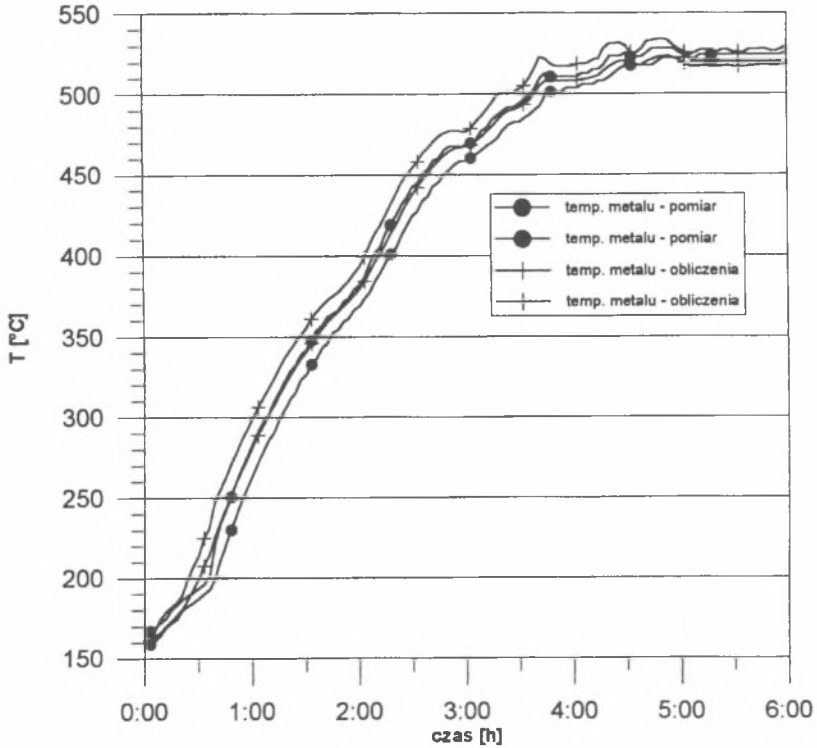
- rys.6 - porównanie przebiegów wartości temperatur metalu pomierzonych oraz obliczonych - procedura 1,



Rys. 6. Porównanie przebiegów wartości temperatur metalu pomierzonych oraz obliczonych - procedura 1

Fig. 6. Comparison of temperature variations gained from measurement and computations - procedure 1

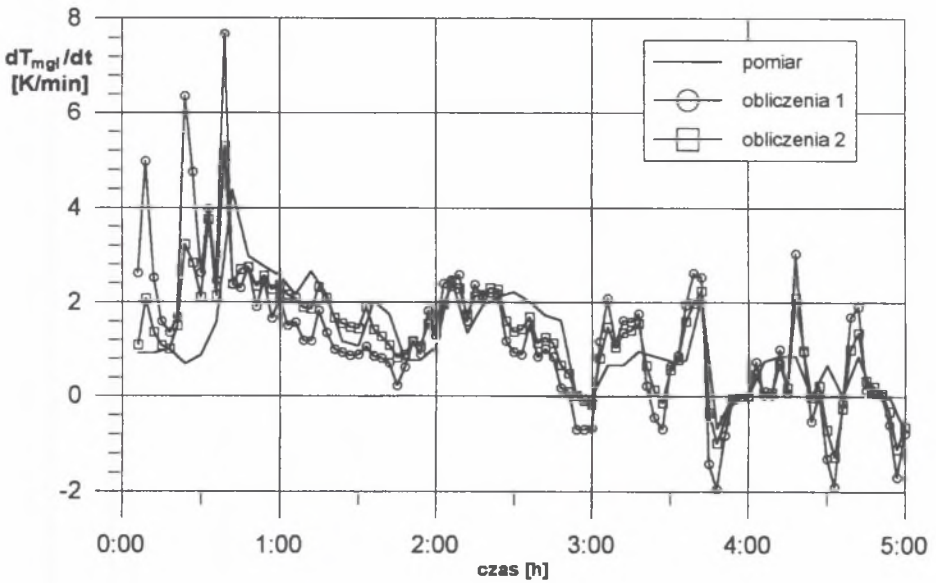
- rys.7 - porównanie przebiegów wartości temperatur metalu pomierzonych oraz obliczonych - procedura 2,



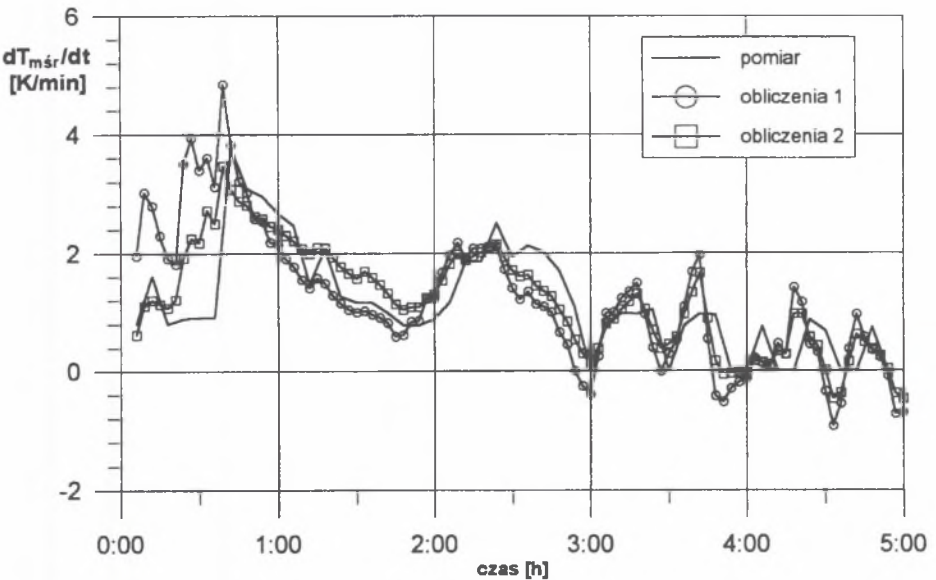
Rys. 7. Porównanie przebiegów wartości temperatur metalu przemierzonych oraz obliczonych - procedura 2  
 Fig. 7. Comparison of temperature variations gained from measurement and computations - procedure 2

- rys.8 - przebiegi czasowe zmierzonej i obliczonej prędkości nagrzewania - temperatura metalu - głęboko,
- rys.9 - przebiegi czasowe zmierzonej i obliczonej prędkości nagrzewania - temperatura metalu - środek,
- rys.10 - przebiegi czasowe zmierzonej i obliczonej różnicy temperatur metalu głęboko - środek.

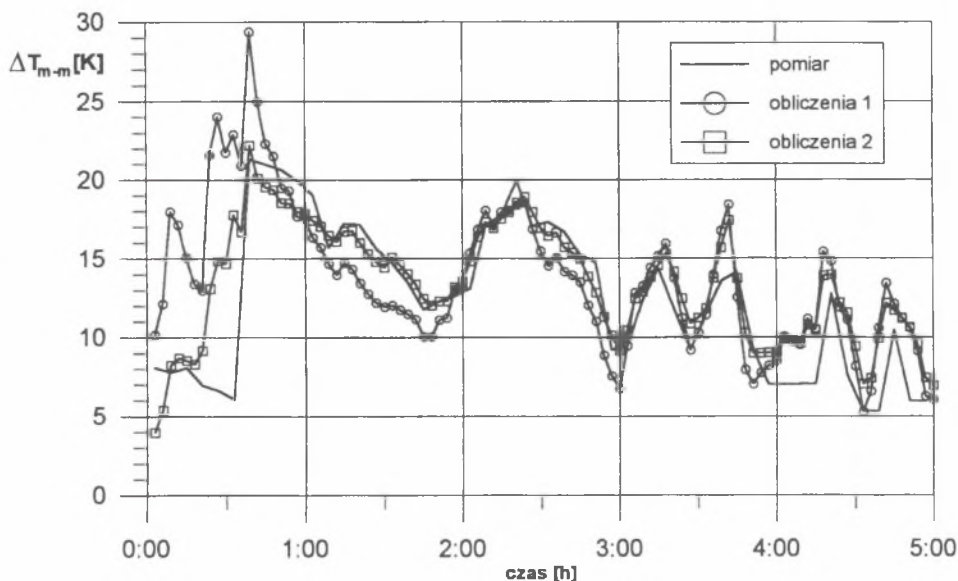
Przedstawione na rysunkach wyniki wyraźnie wskazują na procedurę 2, czyli korzystającą z warunku brzegowego postaci  $\alpha = f(\dot{m})$  jako dokładniejszą i lepiej oddającą proces nagrzewania zaworu.



Rys. 8. Przebiegi czasowe zmierzonej i obliczonej prędkości nagrzewania - temperatura metalu głęboko  
 Fig. 8. Time variations of the measured and computed heating rate for the metal temperature measured deep in the valve wall



Rys. 9. Przebiegi czasowe zmierzonej i obliczonej prędkości nagrzewania-temperatura metalu-środek  
 Fig. 9. Time variations of the measured and computed heating rate for the metal temperature measured in the middle of the valve wall



Rys. 10. Przebiegi czasowe zmierzonej i obliczonej różnicy temperatur metalu głęboko - środek

Fig. 10. Time variations of the measured and computed temperature difference of the metal temperatures measured deep and in the middle of the valve wall

## 6. PODSUMOWANIE

Przedstawiono główne założenia modelowania stanu termicznego elementów turbin parowych dla potrzeb systemu nadzoru diagnostycznego. Model spełnia kryterium krótkiego czasu obliczeń, co stanowi warunek konieczny możliwości wykorzystania opracowanych procedur obliczeniowych do pracy w systemie on-line jako fragment systemu nadzoru. Przedstawiono sposób weryfikacji zaproponowanego modelu i przeprowadzono z pozytywnym skutkiem weryfikację modelu konkretnego elementu - zaworu odcinającego turbiny parowej dużej mocy. Pozytywna weryfikacja modelu obliczania pola temperatury w zaworze pozwala na stwierdzenie, że modele pozostałych elementów, w tym również wirnika, dla różnych stanów eksploatacyjnych maszyny w poprawny sposób opisują zachodzący proces przepływu ciepła.

## LITERATURA

1. Chmielniak T., Kosman G.: Obciążenia cieplne turbin parowych. WNT, Warszawa 1990.
2. Taler J.: Teoria i praktyka identyfikacji procesów przepływu ciepła. „Ossolineum”, Wrocław-Warszawa-Kraków 1995.
3. Chmielniak T. i in.: Analityczne i doświadczalne badania warunków wymiany ciepła w turbinach. Praca naukowo - badawcza, Gliwice 1978-80.
4. Kosman G., Rusin A., Roskosz M., Nowak G., Nawrat K.: Blok modułów modelowania cieplno-wytężeniowego turbin. Sprawozdanie z pracy badawczej PBZ-038. (nie publikowane).
5. Chmielniak T., Kosman G., Łukowicz H.: Badania średnich współczynników wnikania ciepła w kadłubach zaworów turbin parowych. Prace Instytutu Maszyn Przepływowych PAN z.87,1984.

Recenzent: Prof. dr hab.inż. Jan Taler

Wpłynęło do Redakcji: 22.04.1998 r.

**Abstract**

Described problems are chosen parts of the papers that are involved in elaborating of the thermal and strain models of the main turbine components. Results of these papers are used working out for elaborating of the numerical procedures working together with the turbine measurement system and diagnosing the thermal state of the turbine components. In this paper computational models of temperature field of the valves, cylinders and the rotor of the steam turbine are discussed. On the basis of the steam parameters or the steam parameters and the metal temperature in the selected points of the turbine these, models allow to define the thermal state of the main turbine components.

Using the valve as an example this paper presents also the process of forming and verifying of the computational model. Main assumption of the element model has been given and



the method of definition of the heat exchange intensity has been described. Presented results for the real measurement data (computed for the valve of the high-power steam turbine) confirm reasonableness of given assumptions. Positive verifying of the computational models of temperature field in the valve allows to conclude that for different operating states of the turbine the models of the remaining elements (also the rotor) describe process of the heat flow accurate enough.