

POLITECHNIKA KRAKOWSKA IM. TADEUSZA KOŚCIUSZKI

WYDZIAŁ MECHANICZNY



## **PRACA DOKTORSKA**

# Metoda pomiaru lokalnego obciążenia cieplnego ścian komór paleniskowych kotła

---

Andrzej Kowal

PROMOTOR

dr hab. inż. Dawid Taler

Kraków 2011



## Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń .....	5
1. Dotychczasowy stan zagadnienia .....	6
2. Cel i zakres pracy oraz teza pracy .....	8
3. Metody pomiaru temperatury ścian komór paleniskowych kotłów .....	10
3.1. Charakterystyka dotychczasowych metod .....	10
3.2. Metody zastosowane w pracy .....	14
4. Obliczenia temperatury ścian komór paleniskowych kotłów – problem bezpośredni .....	20
4.1. Analityczne przybliżone obliczanie rozkładu temperatury w rurach i płetwach .....	20
4.2. Obliczanie rozkładu temperatury w przekroju poprzecznym ściany komory paleniskowej kotła za pomocą metody elementów skończonych (MES) .....	26
5. Rozkład gęstości radiacyjnego strumienia ciepła na powierzchni mimośrodowej rury ekranowej .....	42
6. Określanie strumienia ciepła i współczynnika wnikania dla rur ekranowych przy pomocy wstawki mimośrodowej .....	56
6.1. Podstawy teoretyczne działania wstawek mimośrodkowych .....	56
6.2. Obliczenia i testy .....	60
6.3. Badania eksperymentalne .....	62
7. Pomiar lokalnego obciążenia cieplnego ściany komory paleniskowej kotła za pomocą miernika Gardona .....	65

7.1. Podstawy teoretyczne działania miernika Gardona .....	65
7.2. Pomiar gęstości strumienia przejmowanego ciepła .....	65
7.3. Pomiar współczynnika wnikania ciepła .....	68
7.4. Badania eksperymentalne .....	69
8. Wyznaczanie lokalnego obciążenia cieplnego ściany komory paleniskowej na podstawie pomiaru temperatury rury ekranowej i płetwy .....	75
8.1. Metoda numeryczna bazująca na metodzie elementów skończonych .....	75
8.2. Testy obliczeniowe.....	76
8.3. Badania eksperymentalne .....	79
9. Wnioski i uwagi końcowe .....	90
Literatura .....	92

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ UŻYTYCH W PRACY

$q_m \left[ \frac{W}{m^2} \right]$	– maksymalne obciążenie cieplne
$\alpha \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	– współczynnik wnikania ciepła
$\lambda \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$	– współczynnik przewodzenia materiału rury
$\lambda_p \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$	– współczynnik przewodzenia materiału płetwy
$b$ [m]	– promień zewnętrzny rury ekranowej
$a$ [m]	– promień wewnętrzny rury ekranowej
$b_p$ [m]	– grubość płetwy
$b_1$ [m]	– grubość płetwy u wierzchołka
$b_2$ [m]	– grubość płetwy i podstawy
$\vartheta^0$ [C]	– temperatura rury
$\vartheta_{cz}^0$ [C]	– temperatura czynnika wewnątrz rury
$Bi$	– liczba Biota, $Bi = \alpha a / \lambda$
$c$ [m]	– promień zewnętrzny rury ekranowej
$e$ [m]	– mimośród
$f_i$ [C]	– zmierzona temperatura ścianki w miejscu $i$
$f$ [C]	– wektor zmierzonej temperatury ścianki
$\alpha$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	– współczynnik wnikania ciepła
$m$	– liczba punktów pomiarowych,
$n$	– liczba parametrów niewiadomych
$r$ [m]	– promień rury ekranowej
$r_i$ [m]	– współrzędna promieniowa dla termoelementu $i$
$u$	– stosunek promienia zewnętrznego do wewnętrznego wstawki, $u(\varphi) = r_o / a$

### Symbole greckie

$\varphi$ [rad]	– współrzędna kątowa
$\varphi_i$ [rad]	– współrzędna kątowa położenia termoelementu $i$
$\theta$ [°C]	– nadwyżka temperatury powyżej temperatury czynnika, $\theta = T - T_f$ ,
$\psi$	– współczynnik opromieniowania

## 1. DOTYCHCZASOWY STAN ZAGADNIENIA

W ostatnich latach opromieniowane ekrany kotłów energetycznych wykonuje się wyłącznie jako ściany szczelne. Rozwiązanie powyższe ma bowiem wiele zalet, z których jako najważniejszą wymienić można możliwość pracy kotłów z nadciśnieniem. Pozwala to na podwyższenie sprawności kotła, gdyż nie występuje podsysanie powietrza do komory paleniskowej [1].

Inną z zalet, równie ważną, jest zastąpienie ciężkiego obmurza stosowanego w kotłach, w których powierzchnie ogrzewalne wykonane są z rur gładkich, lekką izolacją z wełny żużlowej. Ekrany szczelne wykonuje się z rur gładkich, łącząc je poprzez spawanie płaskownikami o stałej grubości; znacznie rzadziej z rur płetwowych walcowanych z płetwami o zmiennej grubości.

Prawidłowe zaprojektowanie ściany membranowej jest złożonym problemem obliczeniowo-konstrukcyjnym. Naturalny obieg wody w kotle następuje wskutek różnicy gęstości mieszaniny parowo-wodnej w parowniku i wody w rurach opadowych. Ujednoczenie przez konstruktora oporów przepływu czynnika w rurach parownika, zapewnienie symetrycznego obciążenia cieplnego komory paleniskowej oraz określenie optymalnych warunków eksploatacyjnych jest zadaniem bardzo trudnym [7, 21, 22]. Rozwiązanie tego zadania utrudnia dodatkowo fakt, że obszary obciążeń cieplnych ulegają przemieszczeniom w zależności od np. aktualnej konfiguracji pracujących palników, miejscowego zanieczyszczenia ekranów, nierównomiernego doprowadzenia powietrza i paliwa do układu palnikowego itp.

Ustalenie odpowiedniego sposobu eksploatacji parowników dla licznych wariantów jest możliwe jedynie drogą badań cyrkulacji i obciążeń cieplnych na obiektach będących w ruchu. Zaburzenia w obiegu wody objawiające się niedostateczną prędkością czynnika, a nawet jego zastojami w poszczególnych rurach parownika, powodują niebezpieczne przekroczenia dopuszczalnych temperatur, a konsekwencji przegrzanie materiału rur. Zjawiskom tym często towarzyszy korozja tlenowa zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni rury, powodując głębokie wżery prowadzące do nieszczelności [12].

Szczególnej uwagi wymaga rozruch ze stanu zimnego kotłów ze ścianami membranowymi, kiedy to cyrkulacja czynnika nie pojawia się we wszystkich rurach jednocześnie. Może to spowodować duże różnice temperatur pomiędzy sąsiednimi sekcjami ekranów. Powstające wówczas niedopuszczalne naprężenia termiczne mogą powodować naderwanie płetw i występowanie nieszczelności [6, 11].

W celu zapobiegania tego typu uszkodzeniom należy poznać rozkład obciążeń cieplnych przynajmniej w najbardziej niebezpiecznych obszarach ekranów, tj. w strefach największych obciążeń cieplnych, np. nad palnikami. Analiza otrzymanego rozkładu obciążeń cieplnych pozwala na zoptymalizowanie technologii uruchamiania kotłów z różnych stanów cieplnych [21].

Wreszcie kontrola obciążenia cieplnego urządzenia kotłowego na bieżąco, w trakcie jego pracy; pozwala np. na uruchamianie w odpowiednim momencie zdmuchiwaczy popiołu [4, 5, 8].

## 2. CEL I ZAKRES PRACY ORAZ TEZA PRACY

Praca niniejsza przedstawia sposób obliczenia obciążenia cieplnego na podstawie pomiaru temperatury w kilku punktach rury ekranowej. Jako dodatkowa wielkość, na obliczenie której pozwala aparat matematyczny oraz technika komputerowa, jest wyznaczany również współczynnik wnikania ciepła od rury do mieszaniny parowo-wodnej oraz jej temperatura [3, 10].

Pomiar temperatury rury ekranowej odbywa się zwykle przy pomocy wstawek [13, 14, 23] (oryginalnych fragmentów ekranu szczelnego) opomiarowanych na warsztacie i następnie zamontowanych do komory paleniskowej. Dokładny sposób przygotowania ekranu kotła do pomiaru temperatury zostanie przedstawiony w dalszej części pracy.

Istnieje pewna trudność związana z montażem wstawek [15] (precyzyjne przygotowanie na warsztacie, odstawienie kotła, montaż w komorze paleniskowej), jednak ich walory związane z monitorowaniem zanieczyszczeń podczas normalnej eksploatacji kotłów są niezaprzeczalne. W bezpośredniej bliskości wstawek zamontowano czujniki Gardona, aby móc na bieżąco weryfikować pomiary. Montaż czujników, chociaż dość precyzyjny, może odbyć się bez wycinania i wstawiania fragmentów ekranu, natomiast same czujniki wystarczą tylko do monitorowania obciążenia cieplnego ekranów kotła. Podstawowym problemem wynikającym z ich zastosowania jest fakt, że ze względu na swą geometrię stanowią miejsce gromadzenia się zanieczyszczeń.

### **Teza pracy jest następująca:**

***Wstawki termometryczne umożliwiają pomiar rzeczywistego lokalnego obciążenia cieplnego rur ekranowych***

Wyniki obliczeń i pomiarów są prezentowane na ekranie komputera, a porównanie obliczonych i zmierzonych wielkości ułatwia ocenę prawidłowości funkcjonowania urządzeń pomiarowych [5].

Zastosowanie pomiarów w układach eksploatacji kotłów energetycznych pozwoli na optymalizację stanu obciążenia komory paleniskowej [25]. Prawidłowa konfiguracja pracy palników jest warunkiem niezbędnym dla równomierności przepływów w rurach parownika i ma bezpośredni wpływ na wydajność urządzenia, trwałość i żywotność elementów urządzenia. Ponadto wszelkie „zakłócenia” związane ze zmianą paliwa czy też współpalaniem biomasy będą miały bezpośrednie odzwierciedlenie w przeprowadzonych pomiarach [19, 20].



W kotłach, w których odbywa się spalanie mieszanki węgla i biomasy, monitorowanie stanu obciążenia komory paleniskowej jest jednym z zasadniczych problemów – zwiększanie udziału paliwa odnawialnego ma bowiem pewne racjonalne granice.

W rozprawie doktorskiej przedstawione zostaną dwie nowe metody pomiaru lokalnego obciążenia ekranu ciepłego kotła. W metodzie pierwszej mierzone będą trzy temperatury ekranu: temperatura czoła rury ekranowej, temperatura środka płetwy (płaskownika łączącego sąsiednie rury ekranowe) oraz temperatura zewnętrznej powierzchni rury od strony poszycia kotła. W metodzie drugiej mierzona jest temperatura wstawki termometrycznej (elementu specjalnie przygotowanego i zamontowanego w ekranie kotła) w czterech punktach usytuowanych w jej czołowej części oraz temperatura zewnętrznej powierzchni rury od strony poszycia kotła. Przeprowadzone zostaną obliczenia testowe i badania eksperymentalne umożliwiające porównanie obu metod.

### 3. METODY POMIARU TEMPERATURY ŚCIAN KOMÓR PALENISKOWYCH KOTŁÓW

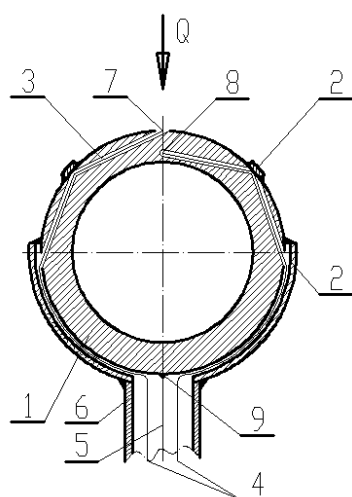
#### 3.1. Charakterystyka dotychczasowych metod

Zasadniczą trudnością przy ocenie pracy konturów parownika kotła jest prawidłowy pomiar temperatury metalu. Jak dotychczas najbardziej przydatną metodą badań temperatur parowników jest pomiar za pomocą termoelementów wmontowanych w ekrany. Najczęściej do prowadzenia tych pomiarów stosuje się tzw. wstawki termometryczne [9]. Wstawki te to oryginalne odcinki rur ekranowych, których ścianki owiercono, biorąc po uwagę wyniki obliczeń wytrzymałościowych.

Operacja wiercenia wymaga dużej dokładności oraz specjalnego oprzyrządowania [14]. O prawidłowości jej wykonania świadczą wyniki prześwietlania wstawki. W tak przygotowane wstawki instaluje się termoelementy płaszczowe. Gotowe wstawki, po sprawdzeniu, montuje się w ekrany parowników. Rysunki 3.1-3.4 przedstawiają niektóre ze sposobów montażu termoelementów we wstawkach.

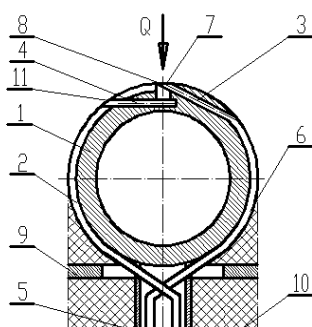
W szczególnych przypadkach firma Sulzer stosuje wiercenie oraz montaż termoelementów w rurach parownika i płetwach bezpośrednio na obiekcie. Technologia ta wymaga jednak stosowania dodatkowego oprzyrządowania składającego się między innymi z szybkoobrotowej wiertarki z giętkim wałkiem, elektromagnetycznego szablonu, a także trudno łamliwych wiertel. Metoda ta, choć wydaje się mniej pracochłonna, to jednak wymaga dużej precyzji wykonania w warunkach montażowych, tzn. na rusztowaniach wewnątrz komory paleniskowej.

Rysunek 3.5 przedstawia sposób zabudowy termopar bezpośrednio na szczelnym ekranie kotła.



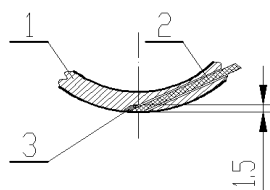
- 1 – rura ekranowa,
- 2 – ochrona termoelementu,
- 3 – nawiercenie,
- 4 – drut termoparowy Ko (w izolacji),
- 5 – drut termoparowy Fe (w izolacji),
- 6 – osłona termoelementu,
- 7 – miejsce zalutowania końcówki termoelementu,
- 8 – miejsce elektrycznego zgrzania drutu Ko,
- 9 – miejsce elektrycznego zgrzania drutu Fe.

**Rys. 3.1.** Przekrój wstawki pomiarowej wg ORGREZ Brno (otwory dla wyprowadzenia termoelementów oddalone w płaszczyźnie poziomej o 10-15 mm).



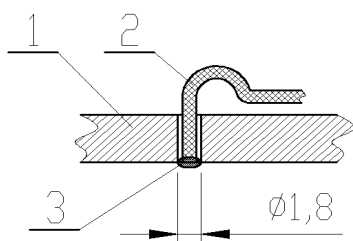
**Rys. 3.2.** Przekrój wstawki pomiarowej wg STEIN – ROUBAIX (otwory dla wyprowadzenia termoelementów oddalone w płaszczyźnie poziomej o 10-20 mm):

1 – rura ekranowa, 2 – osłona termoelementu, 3 – nawiercenie, 4 – termoelement płaszczowy, 5 – osłona termoelementów, 6 – rowek dla umieszczenia termoelementu, 7 – miejsce zalutowania końcówki termoelementu, 8 – otwór dla śruby dociskającej, 9 – blacha opancerzenia obmurza, 10 – obmurze, 11 – miejsce zalutowania termoelementu.



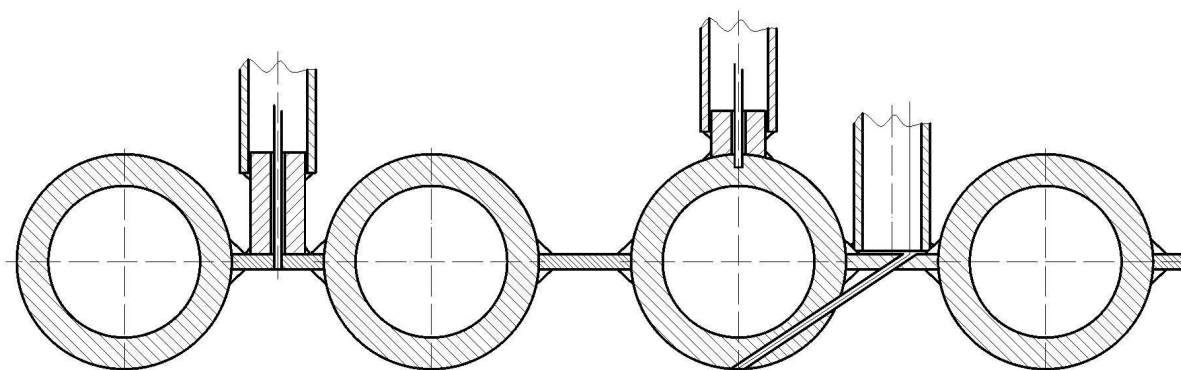
1 – rura ekranowa,  
2 – termoelement płaszczowy,  
3 – miejsce zalutowania termoelementu.

**Rys. 3.3.** Przekrój wstawki pomiarowej w miejscu zamocowania termoelementu (rozwiązanie z *Tiepłoeniergietyki* 1981/11 – rura T).

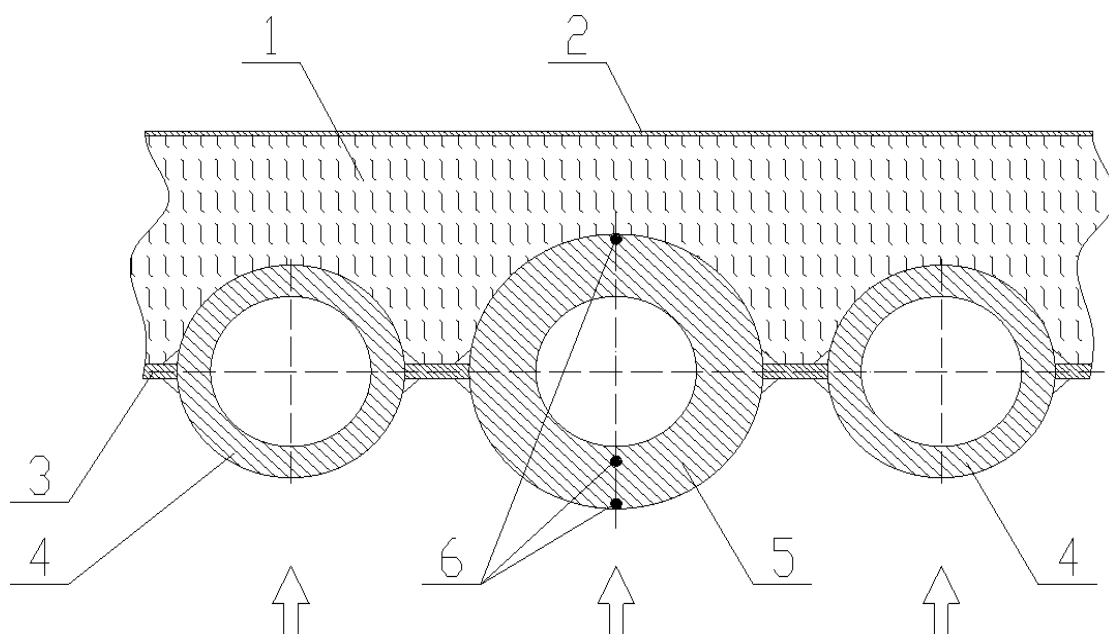


1 – płetwa,  
2 – termoelement płaszczowy,  
3 – miejsce zalutowania termoelementu.

**Rys. 3.4.** Przekrój płetwy w miejscu zamocowania termoelementu – rura T.



**Rys. 3.5.** Sposób zabudowy termoelementów bezpośrednio na szczelnym ekranie kotła wg firmy Sulzer.



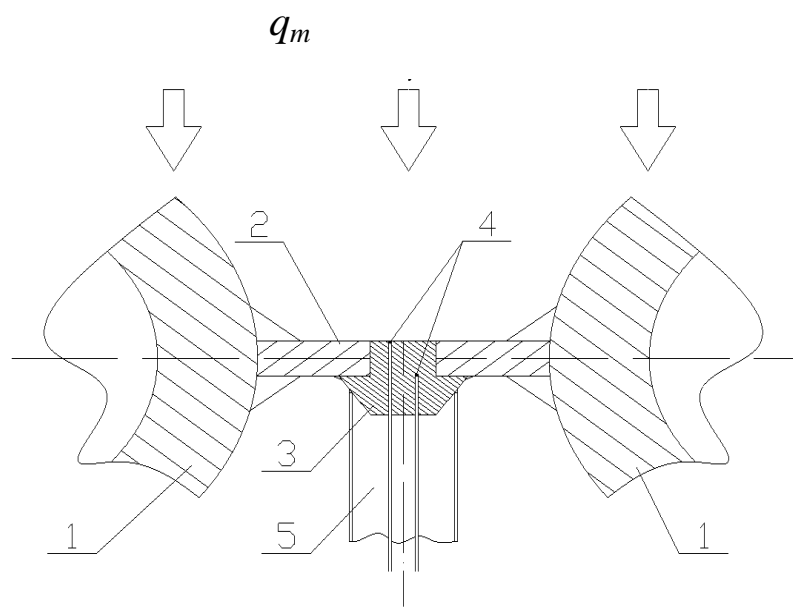
**Rys. 3.6.** Sposób zabudowy termopar dla wstawki termometrycznej:

- 1 – izolacja cieplna, 2 – blacha opancerzenia, 3 – płetwa, 4 – rura ekranowa,  
5 – wstawka termometryczna, 6 – punkty zamocowania termopar.

Rysunki 3.5 i 3.6 przedstawiają pomiar temperatury w trzech punktach ekranu komory paleniskowej. Pomiary te po rozwiązaniu problemu odwrotnego ustalonego przepływu ciepła, umożliwiają wyznaczenie obciążenia cieplnego, współczynnika wnikania ciepła na wewnętrznej

powierzchni rury oraz temperatury czynnika płynącego wewnątrz rury ekranowej. Zaprezentowany przez firmę Sulzer sposób pomiaru temperatury charakteryzuje się prostotą montażu termoelementu w środku płetwy. Wadą rozwiązania pomiaru temperatury przy użyciu wstawki pomiarowej jest duży wpływ niesymetrii pola temperatury na wyniki pomiarów. Niesymetria to wynik zróżnicowania współczynników wnikania na wewnętrznych powierzchniach rur ekranowych i wewnętrznej powierzchni wstawki lub nierównomiernego przyspawania płetw do sąsiednich rur spowodowanym brakiem przetopu na całej grubości płetwy. Większa grubość wstawki pomiarowej (rys. 3.6) jest uzasadniona poprawieniem dokładności pomiarów, gdyż różnica temperatur na grubości wstawki powinna być właściwa. W tym miejscu należy wspomnieć, że właściwości stali austenitycznych, użytych do budowy termoelementów, zmieniają się znacznie wraz temperaturą, stąd konieczność uwzględnienia tego typu zjawisk w badaniach procesów cieplnych [18, 24].

Podstawowym warunkiem dokładnego pomiaru strumienia ciepła jest brak wpływu zamontowanego czujnika na proces wymiany ciepła, tzn. proces powinien zachodzić tak samo, jak w przypadku, gdy czujnik nie był zainstalowany [13]. Trudności w prawidłowym przeprowadzeniu pomiaru powoduje opór kontaktowy pomiędzy czujnikiem a ciałem. Z tego powodu czujniki mierzące temperaturę powierzchni powinny być do niej przylutowane.

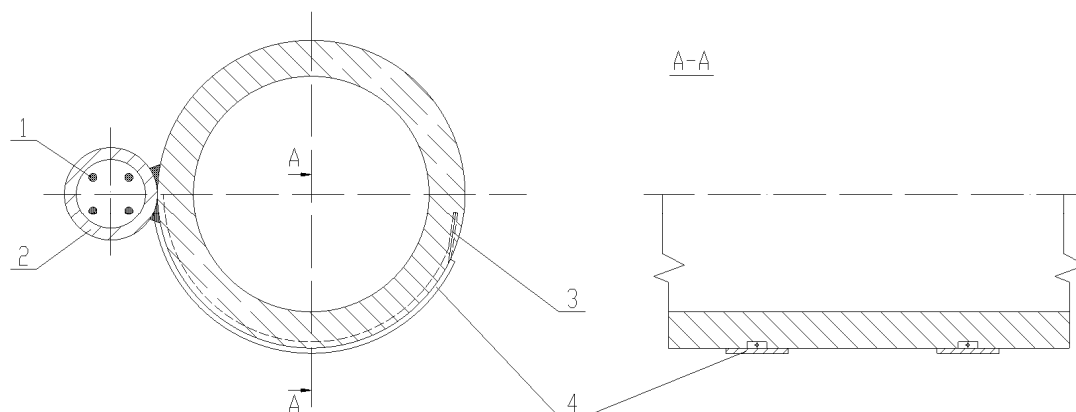


**Rys. 3.7.** Sposób pomiaru temperatury płetwy:

1 – rura, 2 – płetwa, 3 – zabudowa termoelementów, 4 – termoelementy, 5 – osłona.

Należy spodziewać się, że sposób pomiaru płetwy przedstawiony na rys. 3.7 niesie ze sobą niepożądany wpływ oporu kontaktowego na pomiary. Pomiar temperatury powierzchni elementów ciśnieniowych omywanych gorącą wodą jest bardzo trudny. Z tego względu pole temperatury wyznaczone jest na podstawie pomiaru temperatury w kilku wybranych punktach wewnątrz

elementu. Konkretnie rozwiązanie konstrukcyjne pomiaru temperatury zależy oczywiście od geometrii monitorowanej powierzchni: inne będzie zatem dla ekranu szczelnego, inne dla klasycznego ekranu z wymurówką ogniotrwałą, a jeszcze inne np. dla rur przegrzewaczy (rys. 3.8).



**Rys. 3.8.** Pomiar temperatury ścianki rury przegrzewacza pary w kotle:

1 – termoelementy płaszczowe, 2 – rura osłonowa, 3 – otwór skośny, 4 – płaskownik.

Zaznaczyć trzeba, że inne metody pomiaru temperatury ekranów komór paleniskowych kotłów, jak na przykład stosowanie termowizji, dały rezultaty mało zadowalające. Stwierdzono, że metoda jest bardzo skuteczna w przypadku badania rozkładu temperatury, ale w strefach, gdzie nie pracują palniki. Smuga bowiem spalającego się paliwa przesłania badany obszar, nie pozwalając na otrzymanie obrazu termowizyjnego.

### 3.2. Metody zastosowane w pracy

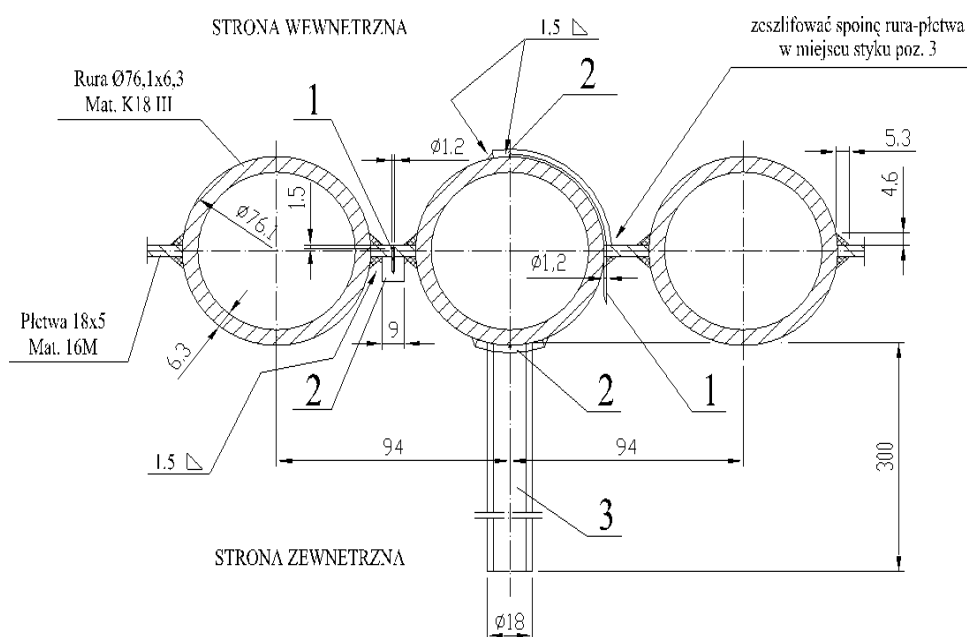
W pracy zastosowano dwie metody pomiaru temperatury ściany ekranowej.

**Metoda pierwsza** wykorzystująca oryginalny odcinek ekranu kotła, w której mierzy się temperaturę w trzech punktach ściany szczelnej (rys 3.9), tj.:

- pomiar w wierzchołku rury (najbardziej wysunięty punkt do wnętrza komory paleniskowej),
- pomiar w środku płetwy (termoelement wprowadzony od strony zewnętrznej),
- pomiar w wierzchołku rury (najbardziej wysunięty punkt na zewnątrz komory paleniskowej od strony izolacji cieplnej).

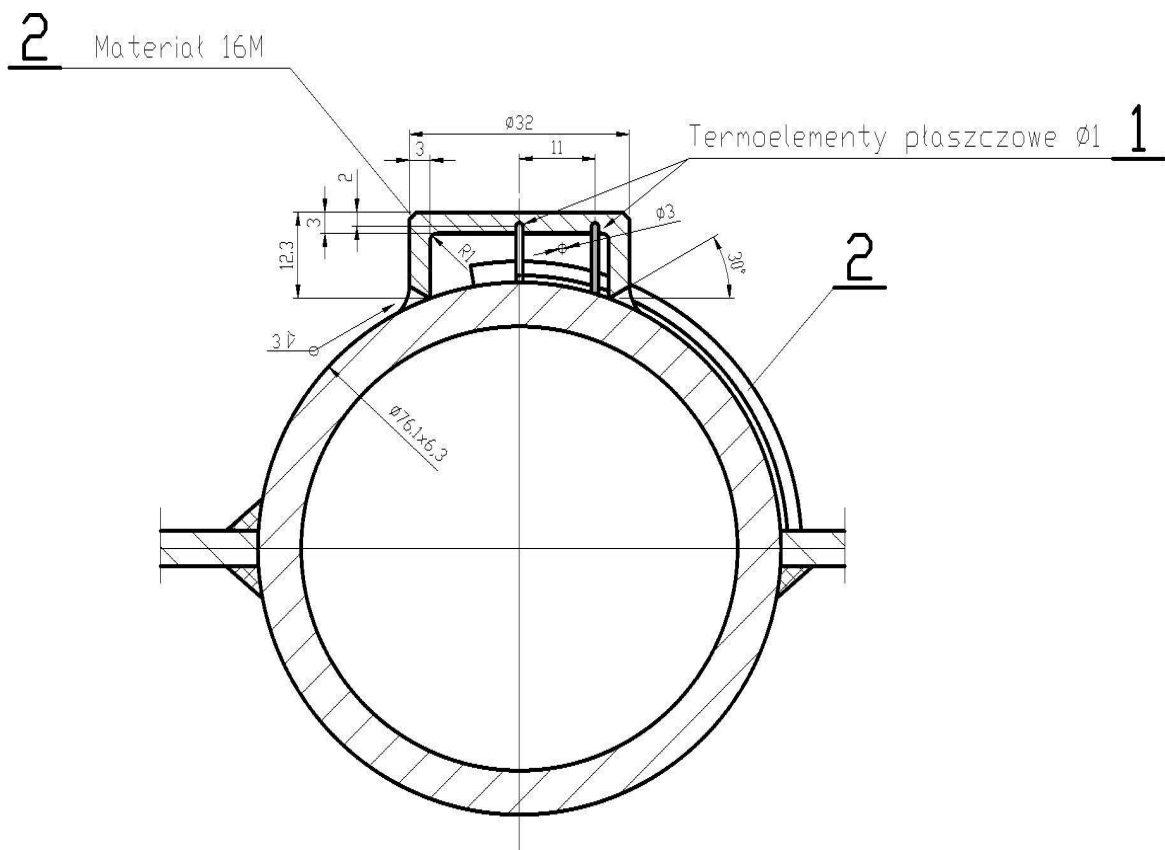
**Metoda druga** opisana została szczegółowo w rozdziale 5. Wymaga ona zastosowania wstawki mimośrodowej, tj. specjalnie przygotowanego odcinka rury tak, aby była możliwość zamocowania termoelementów bez osłabienia materiału pod względem wytrzymałościowym. Duża odległość między termoelementami, w kierunku promieniowym zapewnia wysoką dokładność wyznaczania obciążenia cieplnego. W metodzie tej pomiar temperatury realizowany jest w pięciu punktach na obwodzie wstawki (rys. 5.1). Aby zapewnić właściwe zamocowanie termoelementów oraz osłonić termoelement przed bezpośrednim promieniowaniem od strony płomienia zastosowano osłony. Dodatkowe mocowanie termoelementów zapewnia użycie kleju cermetalowego; przewody termoelementów wyprowadzono przez rurkę na zewnątrz izolacji. Do weryfikacji realizowanych w ten sposób pomiarów w odległości dwóch podziałek od opomiarowanej rury zamontowano mierniki Gardona (rys. 3.10), w których dwa termoelementy osadzono w odpowiednio przygotowanym elemencie przyspawanym do rury ściany ekranowej. Szerzej na temat mierników Gardona, ich konstrukcji i działania traktuje rozdział 7 pracy.

Tak przygotowane 2 komplety pomiarowe (w skład każdego wchodzi 5 termoelementów) zamontowano w ścianie przedniej kotła K6 Elektrowni Skawina na poziomie 12 500 mm (rys. 3.11). W celu zapewnienia odpowiedniej dokładności montażu, komplety pomiarowe wraz z fragmentami ściany szczelnej przygotowano na warsztacie; na samym kotle wykonano tylko montaż fragmentów ekranu. Fotografia 3.12 obrazuje taki element pomiarowy przygotowany do montażu na kotle. Sygnały z pomiarów temperatury przekazywane są na nastawnię blokową, gdzie oprócz pomiaru on-line możliwa jest również ich archiwizacja.



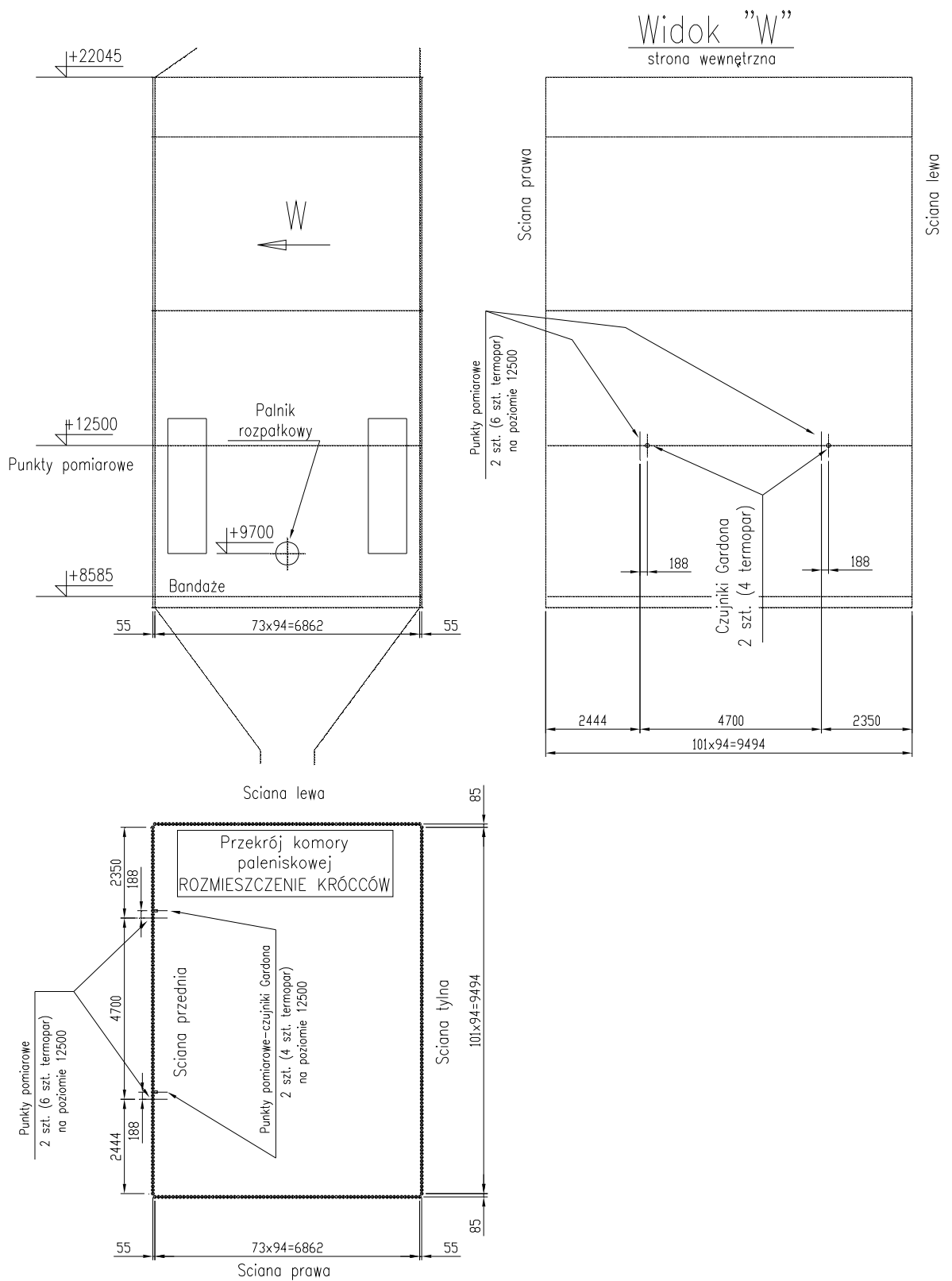
**Rys. 3.9.** Sposób zabudowy termopar na szczelnym ekranie kotła K6:

1 – termoelementy płaszczowe, 2 – osłony termoelementów, 3 – wyprowadzenie przewodów termoelementów



**Rys. 3.10.** Sposób zabudowy miernika Gardona na kotle K6 w Elektrowni Skawina:  
 1 – termoelementy płaszczowe, 2 – osłony termoelementów.





**Rys. 3.11.** Rozmieszczenie punktów pomiarowych w kotle K6 w Elektrowni Skawina



**Rys. 3.12.** Układ pomiarowy przygotowany do montażu w kotle – po lewej stronie znajduje się wstawka termometryczna, a po prawej miernik Gardona.





**Rys. 3.13.** Układ pomiarowy w kotle K6 przed wykonaniem spoin obwodowych rur ekranowych. Widok od strony zewnętrznej kotła.

## 4. OBLICZANIE TEMPERATURY ŚCIAN KOMÓR PALENISKOWYCH KOTŁÓW – PROBLEM BEZPOŚREDNI

### 4.1. Analityczne przybliżone obliczanie rozkładu temperatury w rurach i płetwach

Przedstawiony zostanie poniżej sposób obliczenia temperatury w ekranowej rurze płetwowej przy znanym obciążeniu cieplnym i współczynniku wnikania ciepła oraz znanej temperaturze czynnika przepływającego wewnątrz rury. Metoda ta będąca metodą przybliżoną, jak się przekonamy, daje zadowalające wyniki [17].

Rozkład temperatury w rurze gładkiej opisany jest równaniem przewodzenia ciepła:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (4.1)$$

oraz warunkami brzegowymi:

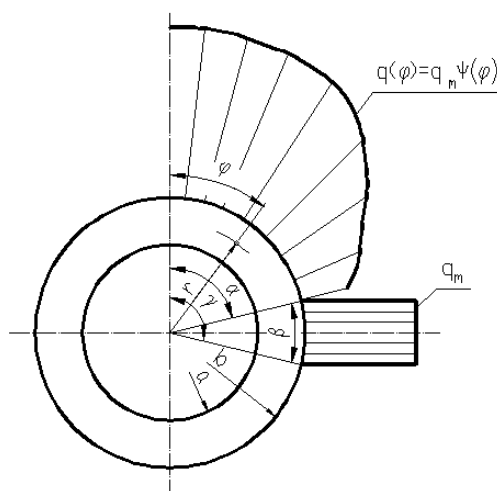
$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=b} = q(\varphi) \quad (4.2)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=a} = \alpha(T - T_{cz}) \quad (4.3)$$

gdzie:

$T$  – temperatura rury,

$T_{cz}$  – temperatura czynnika.



**Rys. 4.1.** Schemat opromieniowania rury wraz z wymiarami charakterystycznymi.

$$q(\varphi) = \begin{cases} q_m \psi(\varphi); & 0 \leq \varphi < \frac{\pi - \beta}{2} \\ q_p & ; \quad \frac{\pi - \beta}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi + \beta}{2} \\ 0 & ; \quad \frac{\pi + \beta}{2} < \varphi \leq \pi \end{cases} \quad (4.4)$$

Strumień ciepły na zewnętrznej powierzchni rury zostanie rozłożony w szereg Fouriera:

$$q(\varphi) = q_0 + \sum_{n=1}^{\infty} q_n \cos(n\varphi) \quad (4.5)$$

w którym:

$$q_0 = \frac{q_m}{\pi\omega} \left[ \sin(\omega \frac{\pi - \beta}{2}) + \frac{q_p \omega \beta}{q_m} \right] \quad (4.6)$$

$$q_n = \frac{2q_m}{(\omega^2 - n^2)} \left[ \omega \sin(\omega \frac{\pi - \beta}{2}) \cos(n \frac{\pi - \beta}{2}) - n \cos(\omega \frac{\pi - \beta}{2}) \sin(n \frac{\pi - \beta}{2}) \right] + \frac{4q_p}{\pi} \cos(\frac{n\pi}{2}) \sin(\frac{n\beta}{2}) \quad (4.7)$$

$n = 1, 2, 3, 4 \dots$

$$q_p = \frac{q_m (s - 2b \frac{1}{\omega} \sin \omega \alpha)}{2b_p} \quad (4.8)$$

Wykorzystując warunki brzegowe otrzymamy ostatecznie:

$$T = \left[ \frac{1}{4} (r^2 - a^2) - \frac{1}{2} b^2 \ln \frac{r}{a} + \frac{1}{2Bi} (a^2 - b^2) \right] f(\varphi) + \frac{q(\varphi)b}{\lambda} \left( \ln \frac{r}{a} + \frac{1}{Bi} \right) + T_{cz} \quad (4.9)$$

gdzie:

$$Bi = \frac{\alpha a}{\lambda} \quad (4.10)$$

$$f(\varphi) = \frac{2m^2}{b^2 - a^2} \left( \frac{1}{2} \frac{b}{\lambda} \ln^2 k + \frac{b}{\lambda} \frac{1}{Bi} \ln k \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q_n n^2}{m^2 + n^2} \cos(n\varphi) \quad (4.11)$$

$$m^2 = \frac{4Bi(k^2 - 1)}{-Bi(k^2 - 1) + 2Bik^2 \ln^2 k + 4(k^2 - 1) \ln k + 2Bi \ln k} \quad (4.12)$$

$$k = \frac{b}{a} \quad (4.13)$$

Pole temperatury w płetwie opisane jest równaniem przewodzenia ciepła:

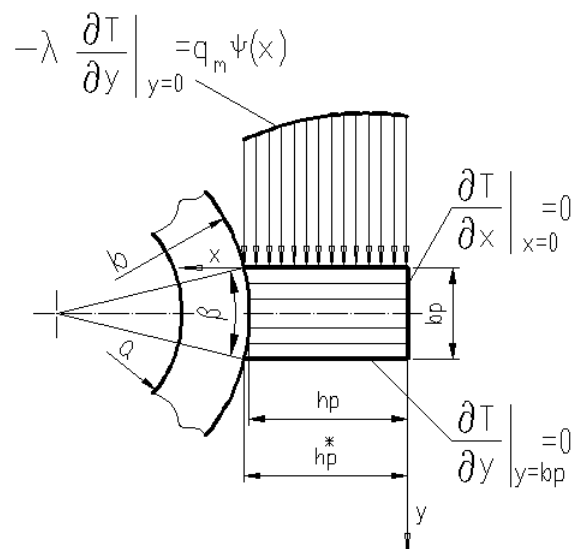
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (4.14)$$

z warunkami brzegowymi:

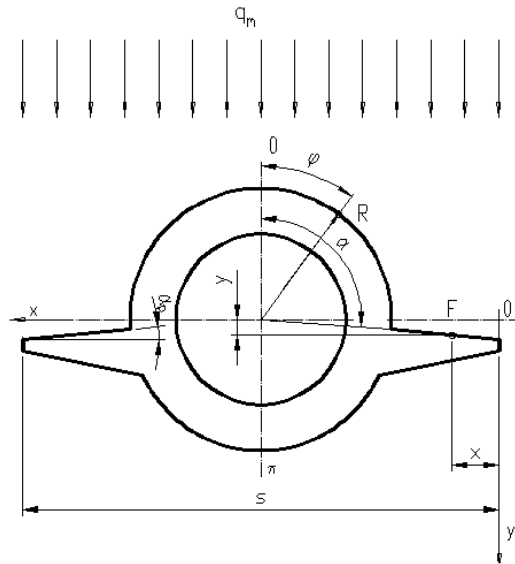
$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = q_m \psi(x) \quad (4.15)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=b_p} = 0 \quad (4.16)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (4.17)$$



Rys. 4.2. Warunki brzegowe wymiany ciepła w płetwie o stałej grubości.



**Rys. 4.3.** Przekrój poprzeczny rury z płetwami o zmiennej grubości objaśniający oznaczenia użyte we wzorach (4.19), (4.20) i (4.21).

$$T \Big|_{x=h_p^*} = T_F(y) \quad (4.18)$$

Współczynnik  $\psi(x)$  opromieniowania płetwy określony jest następującym wzorem obowiązującym zarówno dla płetwy o stałej, jak i zmiennej grubości:

$$\psi(x) = \frac{1}{2} [\sin(\arcsin K_2 - \alpha_p) + \sin(\arcsin K_1 + \alpha_p)] \quad (4.19)$$

gdzie:

$$K_1 = \frac{(\frac{1}{2}S - X) \sqrt{(\frac{1}{2}S - X)^2 - \frac{1}{4} - Y^2} - \frac{1}{2}Y}{(\frac{1}{2}S - X)^2 + Y^2} \quad (4.20)$$

$$K_2 = \frac{(\frac{1}{2}S + X) \sqrt{(\frac{1}{2}S + X)^2 - \frac{1}{4} - Y^2} - \frac{1}{2}Y}{(\frac{1}{2}S + X)^2 + Y^2} \quad (4.21)$$

$$S = \frac{s}{2b}, \quad X = \frac{x}{2b}, \quad Y = \frac{y}{2b} \quad (4.22)$$

Dla płetwy o stałej grubości można dowieść, że:

$$\psi(x) = \frac{1}{2}(K_1 + K_2) \quad (4.23)$$

Dla tej płetwy współczynniki opromieniowania:

$$\psi(x)|_{x=0} = \psi_k \quad (4.24)$$

$$\psi(x)|_{x=h_p^*} = \psi_F \quad (4.25)$$

Zwykle  $\psi(x)$  przybliża się funkcją:

$$\psi(x) = \psi_k - \eta x^m \quad (4.26)$$

gdzie:

$$\eta = \frac{\psi_k - \psi_F}{h_p^{*m}} \quad (4.27)$$

Wartość  $m$  przyjmuje się  $m = 2$  lub  $m = 4$ .

Korzystając dalej z [19] temperaturę płetwy obliczono z wzoru:

$$T = \frac{q_m(\psi_k - \eta x^m)}{\lambda b_p} \left( \frac{1}{2} y^2 - y b_p + \frac{1}{3} b_p^2 \right) + T_{sr} \quad (4.28)$$

$$T_{sr} = \frac{q_m}{\lambda b_p} \left[ -\frac{1}{2} \psi_k x^2 + \frac{\eta x^{m+2}}{(m+1)(m+2)} + \frac{(m+1)(m+2)\psi_k - 2\psi_k + 2\psi_F}{2(m+1)(m+2)} h_p^{*2} \right] + T_F \quad (4.29)$$

We wzorze tym:

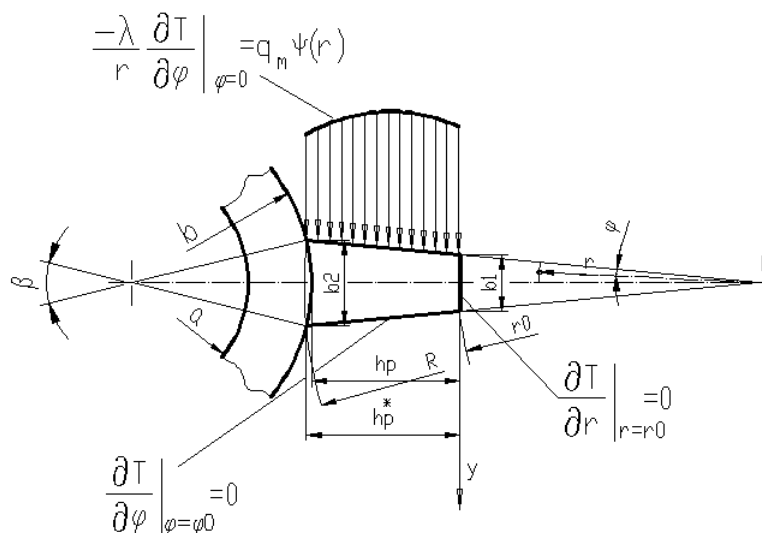
$$T_F = \frac{T(b, \alpha) + T(b, \frac{\pi}{2}) + T(b, \gamma)}{3} \quad (4.30)$$



Poszczególne składniki sumy w liczniku są liczone z wzoru (4.9) na temperaturę w rurze gładkiej.

Pole temperatury w płetwie o przekroju trapezowym opisane jest równaniem przewodzenia ciepła:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (4.31)$$



**Rys. 4.4.** Warunki brzegowe wymiany ciepła w płetwie o zmiennej grubości z warunkami brzegowymi.

$$-\frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0} = q_m \psi(r) \quad (4.32)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\varphi_0} = 0 \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = 0 \quad (4.34)$$

$$T \Big|_{r=R} = T_F(\varphi) \quad (4.35)$$

Temperatura w płetwie o zmiennej grubości według [17] wyrażona jest wzorem:

$$T = \frac{q_m \psi_{sr} r}{\lambda} \left( \frac{1}{2\varphi_0} \varphi^2 - \varphi + \frac{1}{3} \varphi_0 \right) + T_{sr} \quad (4.36)$$

$$T_{sr} = \frac{q_m \psi_{sr}}{\lambda \varphi_0} \left( R - r + r_0 \ln \frac{r}{R} \right) + T_F \quad (4.37)$$

$T_F$  obliczona jest wg wzoru (4.30), a  $q_m \psi_{sr}$  ze wzoru:

$$q_m \psi_{sr} = \frac{q_m \left( s - 2b \frac{1}{\omega} \sin \omega \alpha \right)}{2h_p^*} \quad (4.38)$$

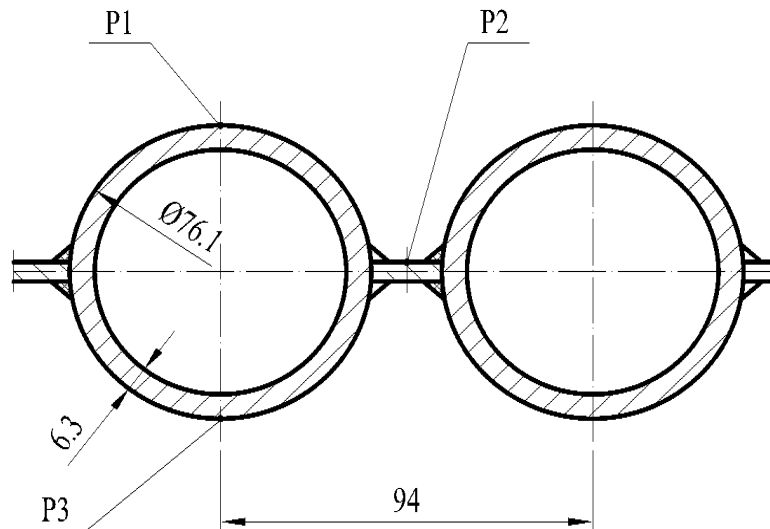
Wzory analityczne wyprowadzone w niniejszym paragrafie mogą być zastosowane do obliczania rozkładu temperatury w rurach ekranowych lub wstawkach termometrycznych przy iteracyjnym wyznaczaniu obciążenia cieplnego  $q_m$ , współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  i temperatury czynnika  $T_{cz}$ . Rozwiązując nieliniowe zagadnienie najmniejszych kwadratów za pomocą metody Levenberga- Marquardta na każdym kroku iteracyjnym wyznaczany jest rozkład temperatury we wstawce termometrycznej.

#### 4.2. Obliczanie rozkładu temperatury w przekroju poprzecznym ściany komory paleniskowej kotła za pomocą metody elementów skończonych (MES)

Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym rur ekranowych lub wstawek termometrycznych może być wyznaczany numerycznie za pomocą metody elementów skończonych (MES). Zaletą MES jest możliwość uwzględnienia rzeczywistego kształtu rur. Można uwzględnić spoinę pomiędzy rurą a płetwą lub brak całkowitego przetopu pomiędzy płetwą a rurą ekranową lub wstawką termometryczną.

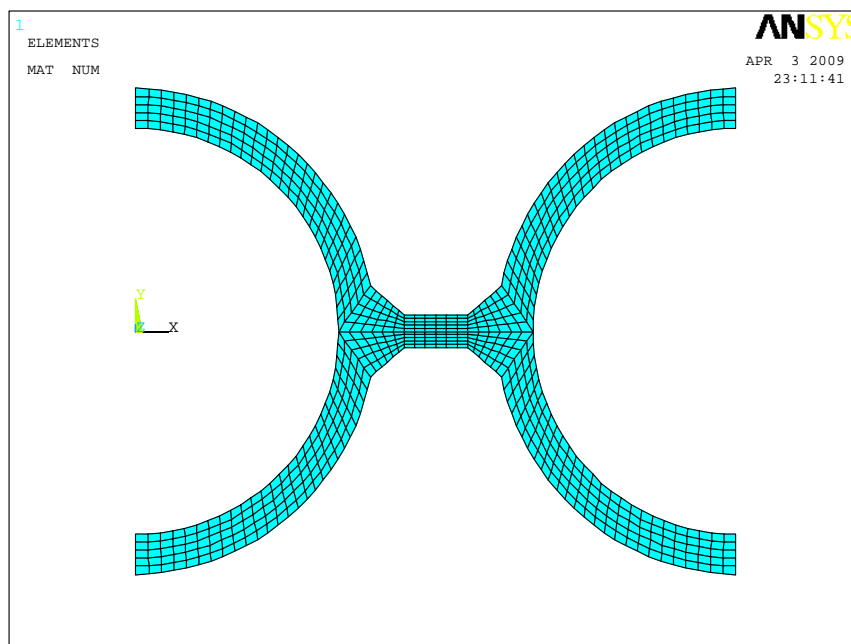
Poniżej przedstawiono obliczenia temperatury dla rury ekranowej kotła K6 w Elektrowni Skawina. Obliczenia wykonano przyjmując określone wartości obciążenia cieplnego  $q_m$ , współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  oraz temperatury czynnika  $T_{cz}$ . Wykorzystano w tym celu możliwości komercyjnego programu ANSYS. Wymiary rur ekranowych są przedstawione na rysunku 4.5

## STRONA WEWNĘTRZNA

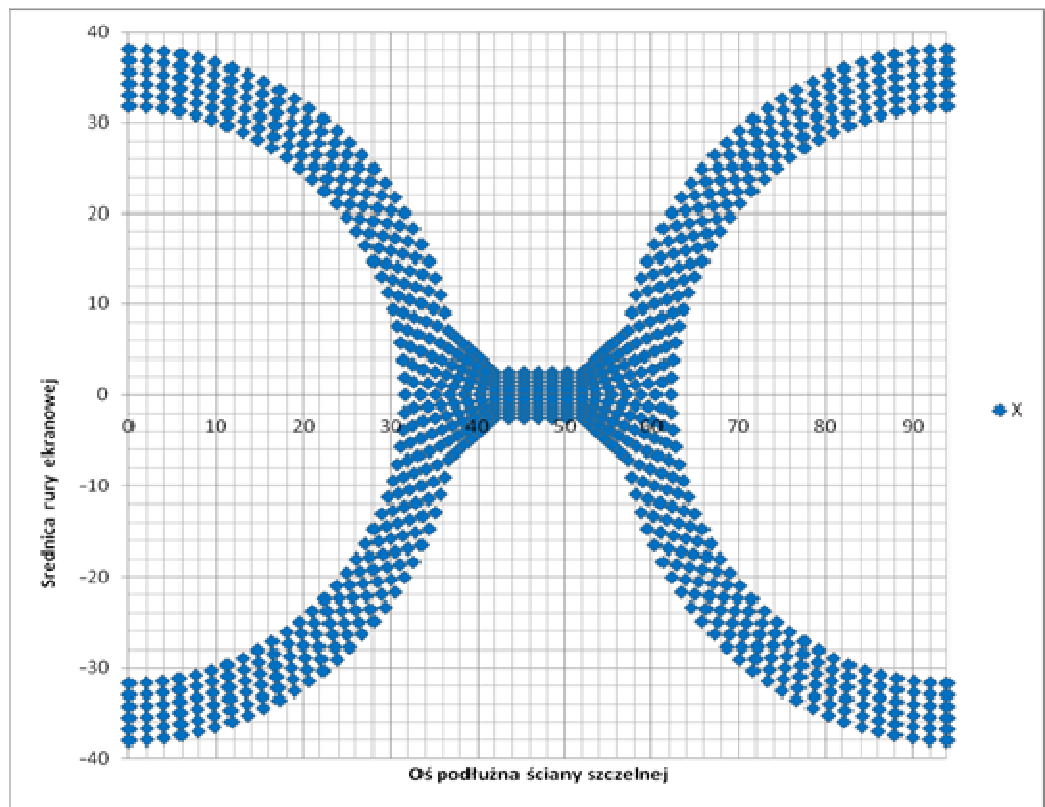


**Rys 4.5.** Punkty pomiarowe ekranu.

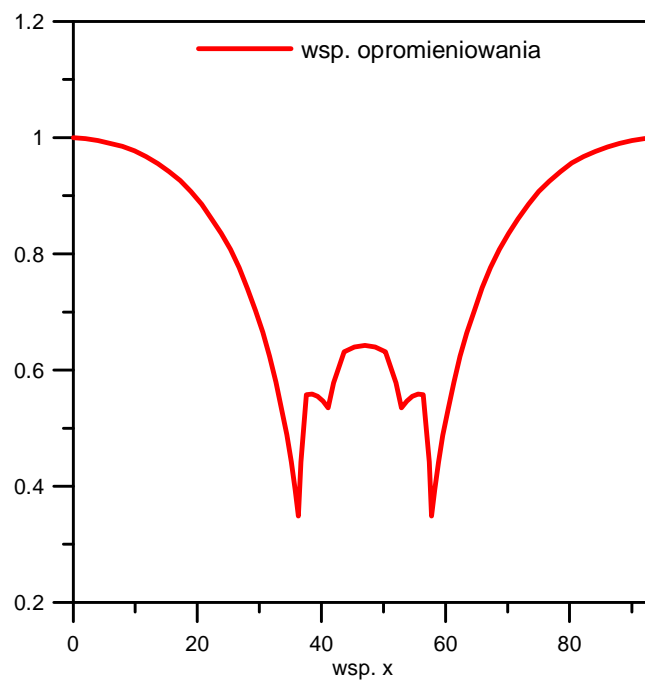
Podział przekroju poprzecznego rury ekranowej na elementy skończone przedstawiono na rysunku 4.6. Rozmieszczenie węzłów, w których wyznaczana jest temperatura uwidocznione jest na rysunku 4.7. Rozkład współczynnika opromieniowania na powierzchni rury, spoin i płaskownika łączącego rury, wyznaczony za pomocą programu ANSYS przedstawiono na rysunku 4.8. W obliczeniach pola temperatury uwzględniono, że współczynnik przewodzenia ciepła materiału rury zależy od temperatury (rys. 4.9)



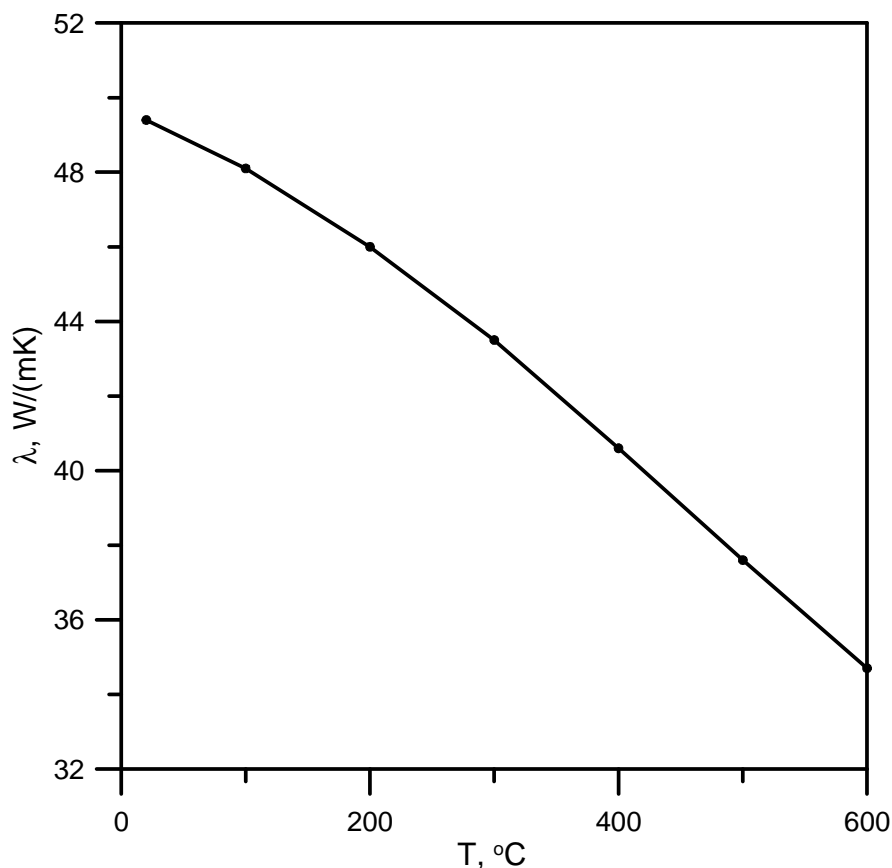
**Rys. 4.6.** Siatka elementów skończonych.



**Rys. 4.7.** Węzły siatki elementów skończonych.



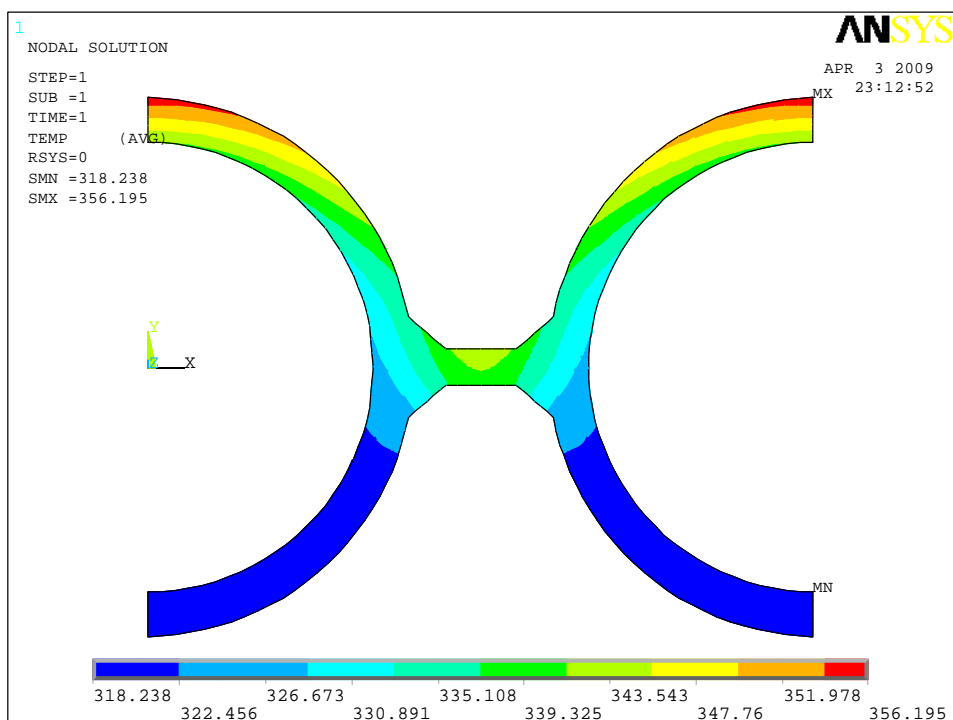
**Rys. 4.8.** Współczynnik opromieniowania czołowej powierzchni płetwy i rur w funkcji współrzędnej „x” (rys 4.7).



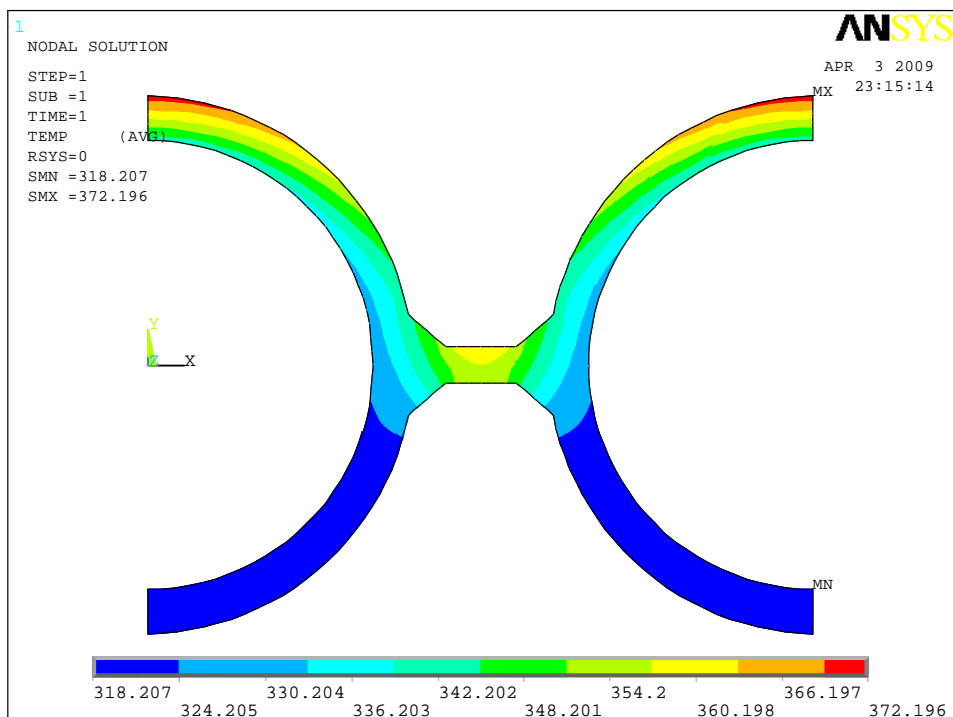
**Rys. 4.9.** Współczynnik przewodzenia ciepła materiału rury ekranowej w funkcji temperatury.

Wyznaczone rozkłady temperatury w przekroju poprzecznym rury i płaskownika przedstawiono na rysunkach 4.10 i 4.11. Z analizy rysunków 4.10 i 4.11 widać, że temperatura rury od strony paleniska jest bardzo silnie zależna od obciążenia cieplnego  $q$  i współczynnika wnikania  $\alpha$  na wewnętrznej powierzchni rury. Ilustrują to również rysunki 4.12 i 4.13. Widać, że maksymalna temperatura rury, występująca w punkcie P1 (rys. 4.5) silnie zależy od współczynnika wnikania ciepła, gdy  $\alpha$  jest mniejsze od 1000 W/(m<sup>2</sup>K). Dla dużych wartości współczynników wnikania ciepła, gdy  $\alpha > 10\,000$  W/(m<sup>2</sup>K) maksymalna temperatura rury zmienia się nieznacznie wraz ze zmianą współczynnika wnikania ciepła.

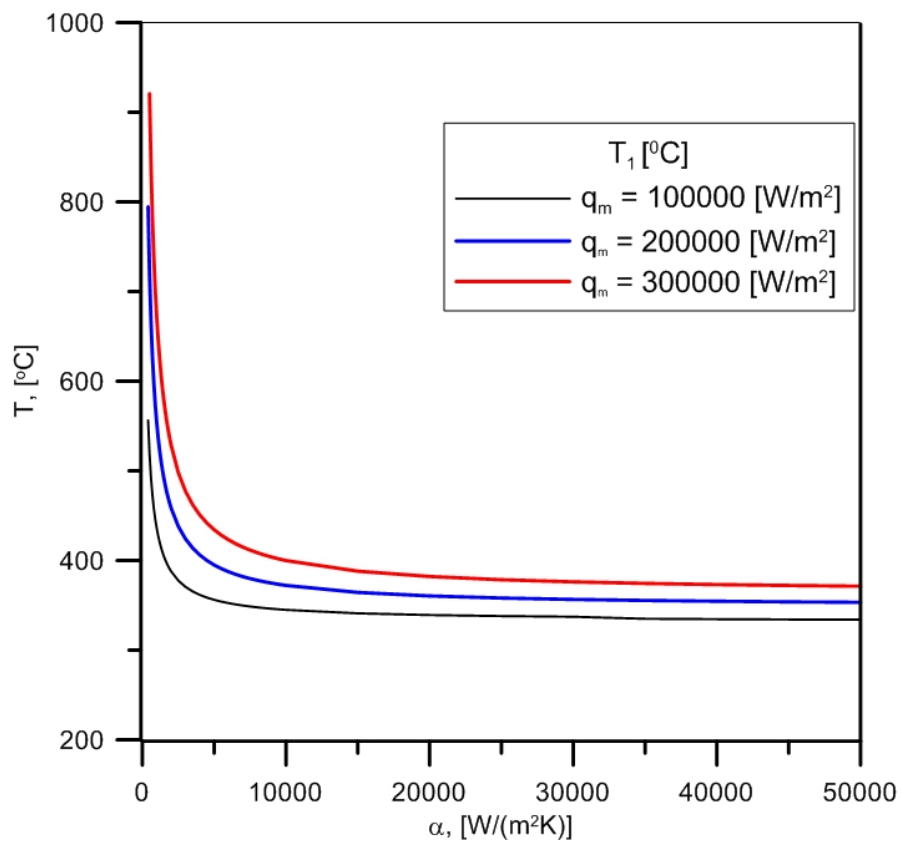
Podobny wpływ ma współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$  na temperaturę płetwy występującą w punkcie P2 (rys. 4.5). Widać, że dla  $\alpha > 10\,000$  W/(m<sup>2</sup>K) temperatura płetwy tylko nieznacznie obniża się, nawet dla dużo większych wartości  $\alpha$  (rys. 4.14 i 4.15)



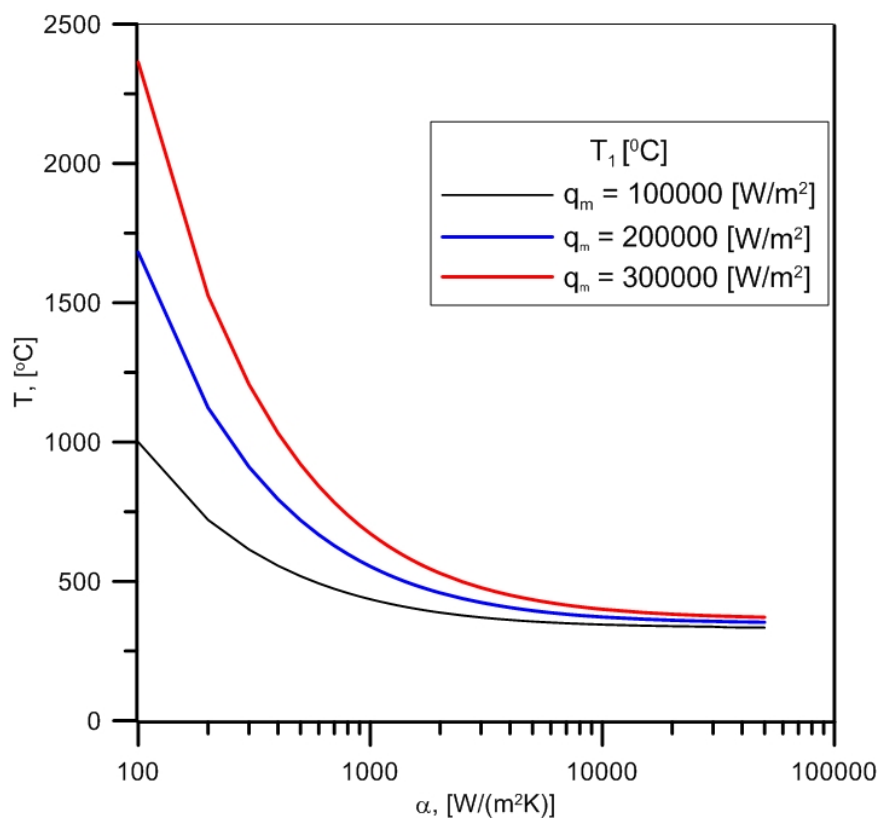
**Rys. 4.10.** Rozkład temperatury dla  $\alpha = 5000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $q = 100\,000 \text{ W}/\text{m}^2$  i  $T_{cz} = 318^\circ\text{C}$  w przekroju poprzecznym fragmentu ekranu.



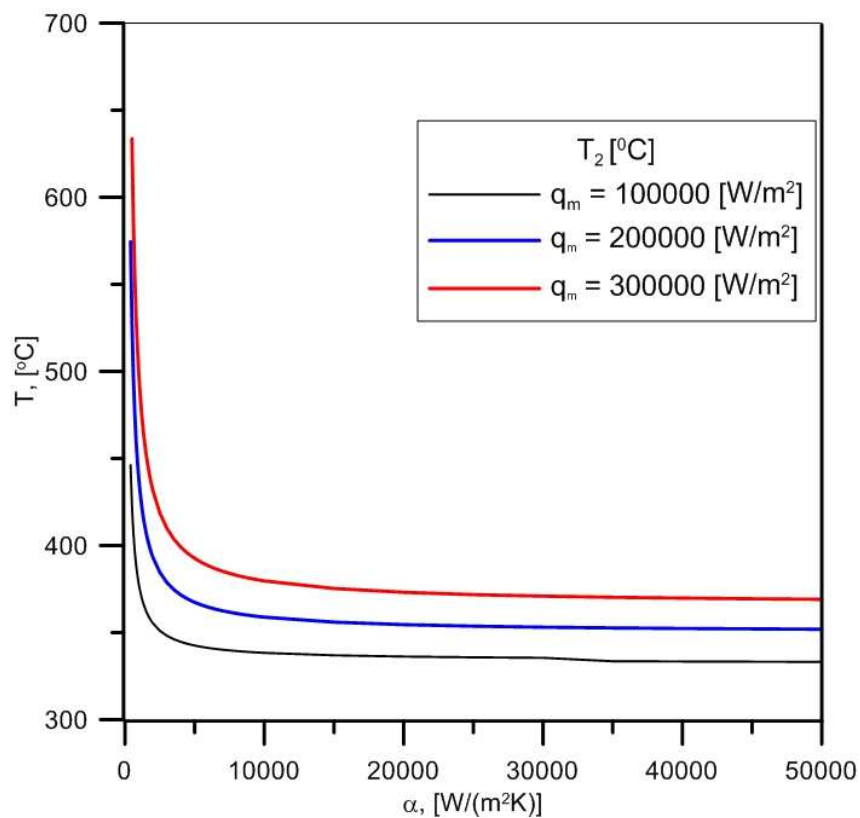
**Rys. 4.11.** Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym fragmentu ekranu dla  $\alpha = 10\,000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $q = 200\,000 \text{ W}/\text{m}^2$  i  $T_{cz} = 318^\circ\text{C}$



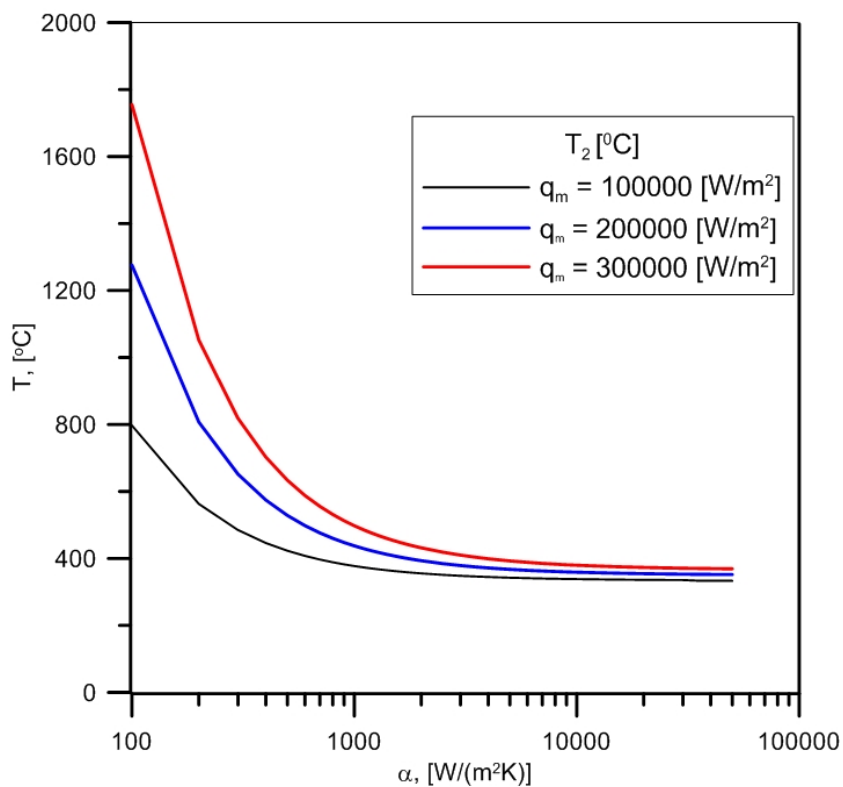
**Rys. 4.12.** Przebieg temperatury w punkcie P1.



**Rys. 4.13.** Przebieg temperatury w punkcie P1 (skala logarytmiczna).



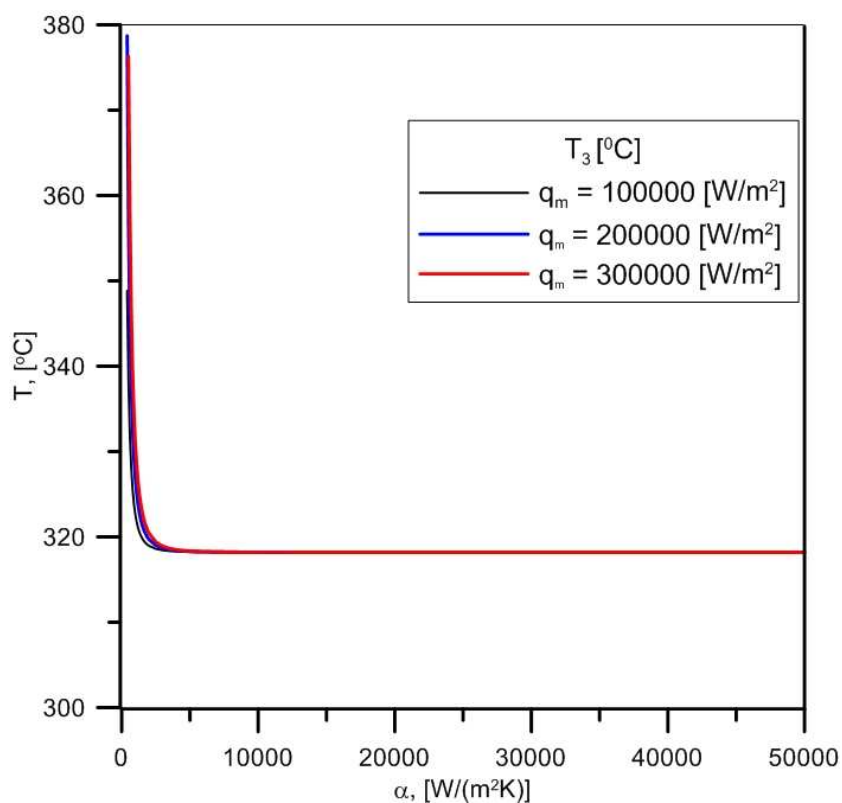
Rys 4.14. Przebieg temperatury w punkcie P2.



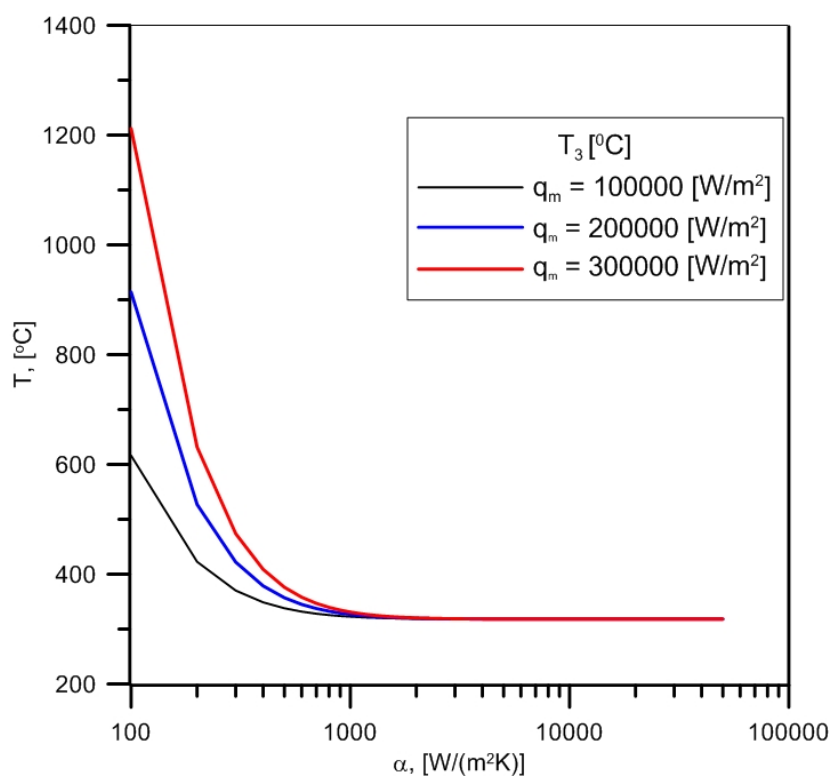
Rys 4.15. Przebieg temperatury w punkcie P2 (skala logarytmiczna).



Temperatura rury od strony izolacji (Punkt P3 na rysunku 4.5) w niewielkim stopniu zależy od obciążenia cieplnego  $q_m$  i współczynnika wnikania  $\alpha$  (rys. 4.16 i 4.17). Gdy  $\alpha > 500 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  to można przyjąć, że temperatura w punkcie P3 jest równa temperaturze czynnika.



Rys 4.16. Przebieg temperatury w punkcie P3.



Rys 4.17. Przebieg temperatury w punkcie P3 (skala logarytmiczna).

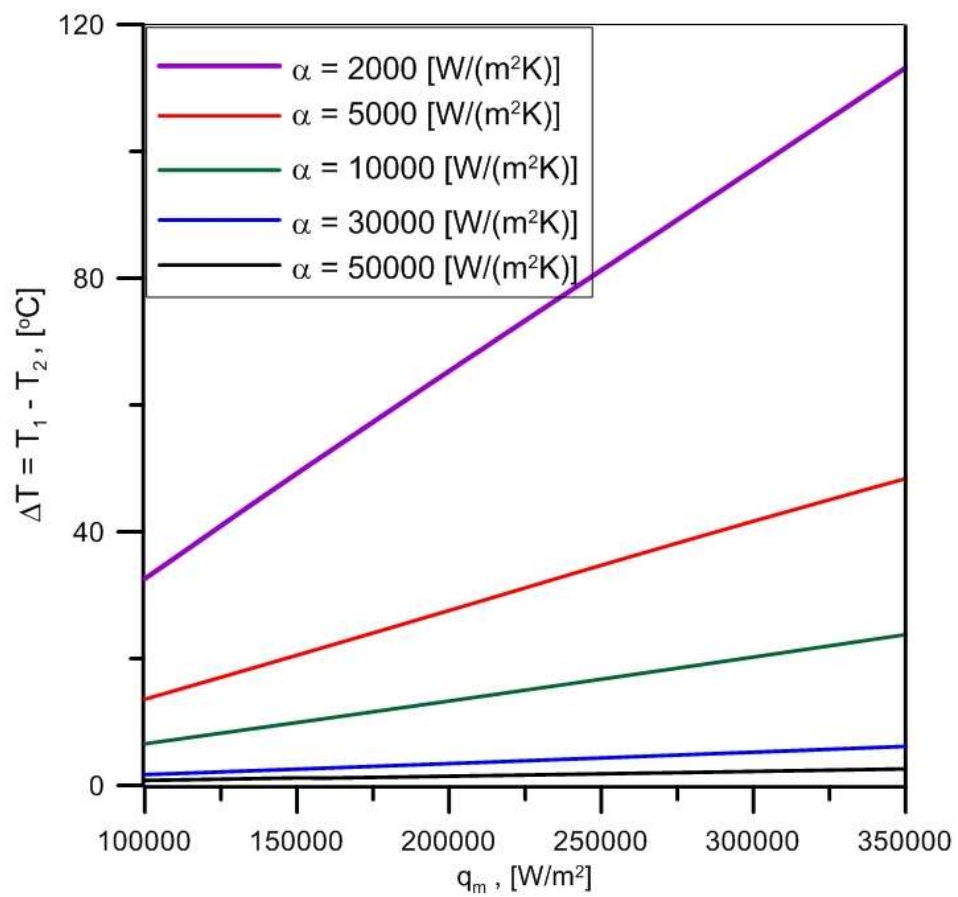
Temperatury metalu w punktach P1, P2 i P3 dla różnych wartości obciążenia cieplnego  $q_m$  i współczynnika wnikania  $\alpha$  zestawiono w tablicy 4.1, a zmiany różnicy temperatury  $\Delta T = T_1 - T_2$  w funkcji  $q_m$  i  $\alpha$  ilustruje rysunek 4.18 i tablica 4.2

**Tablica 4.1** Wyniki obliczeń temperatur T1, T2, T3 w funkcji obciążenia cieplnego i współczynnika wnikania.

$\alpha$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	q = 1000000 [W/m <sup>2</sup> ]			q = 2000000 [W/m <sup>2</sup> ]			q = 3000000 [W/m <sup>2</sup> ]		
	T1 [°C]	T2[°C]	T3[°C]	T1[°C]	T2[°C]	T3[°C]	T1[°C]	T2[°C]	T3[°C]
200	720,5884	562,6605	422,6576	1122,977	807,1211	527,1153	1525,365	1051,582	631,5729
300	614,5556	484,9325	370,244	910,9269	651,712	422,0257	1207,29	818,468	473,9386
400	556,3466	446,2133	348,8381	794,5688	574,5209	378,7135	1032,754	702,686	408,9223
500	518,9436	423,0766	338,0419	719,7951	528,4803	357,176	920,6075	633,6928	376,3095
600	492,6732	407,7144	331,8835	667,2676	497,9589	345,0084	841,8253	587,9823	358,0371
700	473,122	396,7807	328,0707	628,1724	476,282	337,5137	783,1863	555,5247	346,8505
800	457,9635	388,6595	325,567	597,8613	460,1133	332,6082	737,7209	531,3219	339,5514
900	445,8448	382,3981	323,8479	573,6317	447,6017	329,2469	701,3766	512,6008	334,5596
1000	435,9225	377,4229	322,6253	553,7975	437,6378	326,8596	671,625	497,701	331,0185
1100	427,6403	373,3746	321,7306	537,2488	429,5175	325,1138	646,8015	485,5681	328,4314
1200	420,616	370,0162	321,0603	523,2236	422,7716	323,806	625,7631	475,5008	326,495
1300	414,5738	367,1851	320,5478	511,18	417,077	322,8062	607,6975	467,0168	325,0154

1400	409,3063	364,7663	320,1494	500,7224	412,2034	322,0283	592,0111	459,769	323,8651
1500	404,6707	362,6763	319,8349	491,5545	407,9826	321,414	578,2593	453,5077	322,957
1600	400,5619	360,8528	319,5835	483,4498	404,292	320,9224	566,1026	448,0435	322,2305
1700	396,9052	359,2482	319,3801	476,2322	401,0446	320,5244	555,277	443,233	321,6425
1800	393,6294	357,8254	319,2139	469,7627	398,1686	320,1988	545,5737	438,9641	321,1615
1900	390,6774	356,5554	319,0769	463,9299	395,6034	319,9301	536,826	435,1502	320,7643
2000	388,0033	355,4149	318,9629	458,6437	393,3011	319,7063	528,8985	431,7209	320,4336
2500	377,6829	351,1043	318,6093	438,2204	384,6028	319,0107	498,2821	418,7001	319,4046
3000	370,6536	348,2525	318,4414	424,2461	378,8443	318,679	477,4122	410,0097	318,913
3500	365,5538	346,2266	318,3525	414,0012	374,7496	318,503	462,2632	403,7968	318,6517
4000	361,6833	344,7129	318,3015	406,161	371,6885	318,402	450,7585	399,1502	318,5014
4500	358,6447	343,5389	318,2705	399,9829	369,313	318,3404	441,6924	395,5431	318,4096
5000	356,1953	342,6013	318,2507	395,0057	367,4154	318,301	434,3312	392,6609	318,3509
5500	354,1787	341,8352	318,2375	390,9097	365,8643	318,2747	428,2355	390,3044	318,3117
6000	352,4894	341,1971	318,2284	387,4796	364,5724	318,2566	423,0965	388,3414	318,2847
6500	351,0536	340,6575	318,222	384,5649	363,4795	318,2438	418,7179	386,6805	318,2656
7000	349,8182	340,1949	318,2173	382,0576	362,5427	318,2346	414,9293	385,2567	318,2517

7500	348,7439	339,794	318,2139	379,8777	361,7306	318,2277	411,6345	384,0223	318,2414
8000	347,8011	339,4431	318,2113	377,9649	361,0197	318,2225	408,7233	382,9418	318,2337
8500	346,967	339,1334	318,2093	376,2729	360,3921	318,2185	406,1472	381,9878	318,2277
9000	346,2239	338,8579	318,2077	374,7657	359,834	318,2154	403,8526	381,1393	318,2231
9500	345,5576	338,6112	318,2065	373,4143	359,3342	318,213	401,7957	380,3796	318,2194
10000	344,9568	338,3891	318,2055	372,196	358,8842	318,211	399,9413	379,6954	318,2165
15000	341,1265	336,9773	318,2016	364,4303	356,0232	318,2031	388,1265	375,3457	318,2047
20000	339,1944	336,2661	318,2007	360,5145	354,5818	318,2014	382,1718	373,1541	318,202
25000	338,0297	335,8367	318,2004	358,1543	353,7115	318,2007	378,5833	371,8309	318,2011
30000	337,2509	335,549	318,2002	356,5762	353,1283	318,2005	376,1844	370,9442	318,2007
35000	334,9941	333,5824	318,2002	355,4467	352,71	318,2003	374,4675	370,3083	318,2005
40000	334,5812	333,4295	318,2001	354,5984	352,3953	318,2003	373,1781	369,8297	318,2004
45000	334,2596	333,3102	318,2001	353,9378	352,1498	318,2002	372,1741	369,4565	318,2003
50000	334,002	333,2146	318,2001	353,4089	351,953	318,2002	371,3702	369,1571	318,2002



**Rys. 4.18.** Różnica temperatur w wierzchołku rury i środku płetwy w funkcji obciążenia cieplnego.

**Tablica 4.2.** Różnica temperatur T1, T2 w funkcji obciążenia cieplnego.

q [W/m <sup>2</sup> ]	Alfa = 2000 [W/(m <sup>2</sup> K)]			Alfa = 5000[W/(m <sup>2</sup> K)]			Alfa = 10000[W/(m <sup>2</sup> K)]			Alfa = 30000[W/(m <sup>2</sup> K)]			Alfa = 50000[W/(m <sup>2</sup> K)]		
	T1[°C]	T2[°C]	ΔT[°C]	T1[°C]	T2[°C]	ΔT[°C]	T1[°C]	T2[°C]	ΔT[°C]	T1[°C]	T2[°C]	ΔT[°C]	T1[°C]	T2[°C]	ΔT[°C]
100000	388,0033	355,4149	32,58838	356,1953	342,6013	13,594	344,9568	338,3891	6,567734	337,2509	335,549	1,701908	334,002	333,2146	0,787409
110000	395,092	359,172	35,91992	360,0387	345,0638	14,97483	347,6587	340,4247	7,23399	339,1709	337,2964	1,874485	335,5822	334,7161	0,86615
120000	402,2015	362,9359	39,26555	363,8903	347,5305	16,35973	350,3653	342,4633	7,902021	341,0937	339,0462	2,047506	337,1624	336,2175	0,944891
130000	409,3195	366,7066	42,61297	367,7501	350,0014	17,74872	353,0769	344,505	8,571842	343,0193	340,7983	2,220971	338,7426	337,719	1,023632
140000	416,4107	370,484	45,92669	371,6183	352,4764	19,14187	355,7933	346,5499	9,243465	344,9476	342,5527	2,394883	340,3228	339,2205	1,102373
150000	423,4764	374,2683	49,20816	375,4948	354,9556	20,53921	358,5147	348,5978	9,916903	346,8787	344,3095	2,569245	341,903	340,7219	1,181114
160000	430,519	378,0595	52,45955	379,3798	357,4391	21,94078	361,241	350,6488	10,59217	348,8126	346,0685	2,744059	346,2919	345,1333	1,158624
170000	437,5542	381,858	55,69621	383,2734	359,9268	23,34663	363,9722	352,7029	11,26928	350,7493	347,83	2,919326	348,0676	346,8349	1,232651
180000	444,5859	385,6643	58,92162	387,1755	362,4187	24,75681	366,7084	354,7602	11,94825	352,6888	349,5937	3,09505	349,8456	348,5387	1,306873
190000	451,6155	389,4785	62,13694	391,0863	364,9149	26,17136	369,4497	356,8206	12,62909	354,6311	351,3598	3,271232	351,626	350,2448	1,381291
200000	458,6437	393,3011	65,34257	395,0057	367,4154	27,59033	372,196	358,8842	13,31181	356,5762	353,1283	3,447876	353,4089	351,953	1,455905
210000	465,6709	397,1323	68,53868	398,934	369,9202	29,01377	374,9473	360,9509	13,99643	358,5241	354,8991	3,624983	355,1941	353,6634	1,530718
220000	472,6975	400,9723	71,72525	402,8711	372,4294	30,44172	377,7038	363,0208	14,68297	360,4749	356,6723	3,802555	356,9817	355,376	1,605729
230000	479,7236	404,8214	74,90218	406,8171	374,9429	31,87423	380,4653	365,0939	15,37143	362,4285	358,4479	3,980596	358,7718	357,0908	1,680939
240000	486,7492	408,6758	78,07343	410,7638	377,4608	33,30305	383,232	367,1701	16,06184	364,385	360,2259	4,159106	360,5642	358,8079	1,75635
250000	493,7746	412,5262	81,24834	414,7031	379,983	34,7201	386,0038	369,2496	16,7542	366,3444	362,0063	4,33809	362,3591	360,5272	1,831962
260000	500,7997	416,3733	84,42638	418,6393	382,5097	36,12961	388,7808	371,3323	17,44853	368,3066	363,789	4,517549	364,1564	362,2487	1,907776

270000	507,8246	420,2149	87,60963	422,5682	385,0408	37,52743	391,5631	373,4182	18,14486	370,2717	365,5742	4,697485	365,9562	363,9724	1,983794
280000	514,8493	424,0537	90,79565	426,4972	387,5763	38,92085	394,3505	375,5074	18,84318	372,2397	367,3618	4,877902	367,7584	365,6984	2,060016
290000	521,874	427,8886	93,98542	430,414	390,1164	40,29765	397,1433	377,5998	19,54352	374,2106	369,1518	5,058801	369,5631	367,4267	2,136442
300000	528,8985	431,7209	97,17766	434,3312	392,6609	41,67036	399,9413	379,6954	20,24589	376,1844	370,9442	5,240184	371,3702	369,1571	2,213075
310000	535,923	435,5502	100,3727	438,2439	395,2099	43,03404	402,7447	381,7944	20,9503	378,1611	372,739	5,422056	373,1798	370,8899	2,289915
320000	542,9474	439,3773	103,5701	442,1461	397,7634	44,38271	405,5533	383,8966	21,65678	380,1407	374,5363	5,604417	374,9919	372,6249	2,366963
330000	549,9717	443,2022	106,7695	446,0472	400,3214	45,72573	408,3674	386,0021	22,36534	382,1233	376,336	5,787271	376,8064	374,3622	2,444219
340000	556,9959	447,0253	109,9707	449,948	402,8841	47,06395	411,1869	388,1109	23,076	384,1088	378,1382	5,97062	378,6235	376,1018	2,521686
350000	564,0202	450,8469	113,1733	453,8359	405,4513	48,38454	414,0039	390,223	23,78091	386,0973	379,9429	6,154466	380,443	377,8437	2,599363

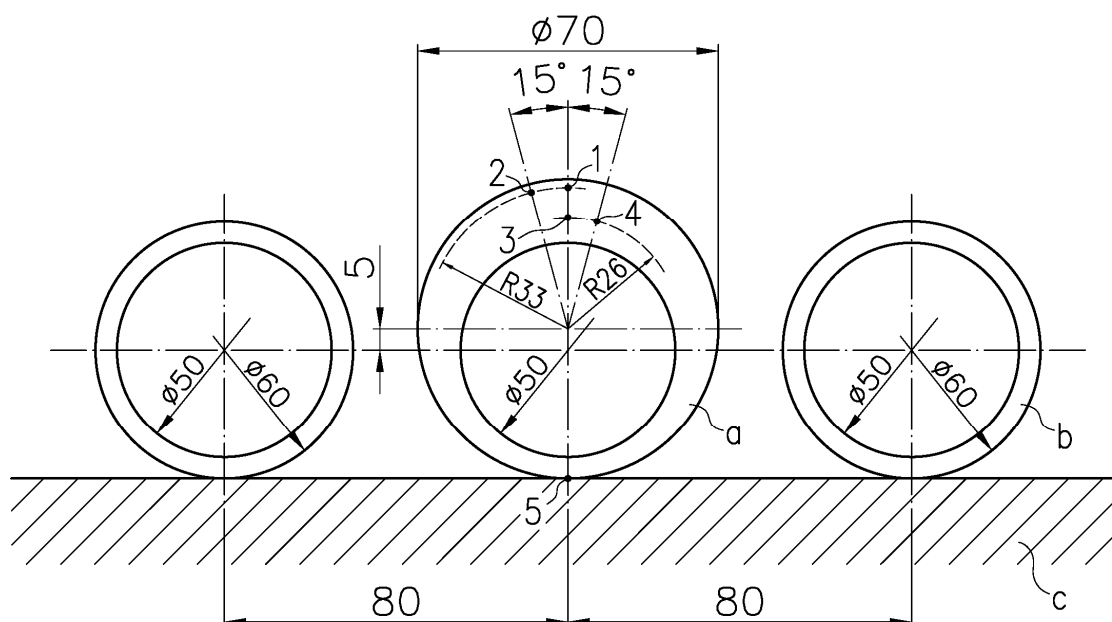


Z przeprowadzonych analiz wpływu obciążenia cieplnego  $q_m$  i współczynnika wnikania  $\alpha$  na wewnętrznej powierzchni rury wynika, że dla dużych wartości  $\alpha > 10\,000\text{ W/(m}^2\text{K)}$  temperatury w punktach P1, P2 i P3 (rys. 4.5) w niewielkim stopniu zależą od współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$ . Współczynnik wnikania ciepła w rurach ekranowych, w których przepływa mieszanina pary i wody jest zwykle większy od  $20\,000\text{ [W/(m}^2\text{K)}$ ). Nie jest więc możliwe wyznaczenie wartości  $\alpha$  na podstawie pomiaru temperatury w punktach P1, P2 i P3. Na podstawie pomiaru temperatury metalu w punktach P1, P2 i P3 może być wyznaczone tylko obciążenie cieplne  $q_m$  i temperatura czynnika  $T_{cz}$ . W celu wyznaczenia wszystkich trzech parametrów:  $q_m$ ,  $\alpha$  i  $T_{cz}$  niezbędny jest pomiar temperatury rury ekranowej lub wstawki termometrycznej w punktach leżących wewnątrz ścianki i usytuowanych na różnych promieniach.

## 5. ROZKŁAD GĘSTOŚCI RADIACYJNEGO STRUMIENIA CIEPŁA NA POWIERZCHNI MIMOŚRODOWEJ RURY EKRANOWEJ

Mimośrodowe wstawki termometryczne zastosowane zostaną do identyfikacji warunków brzegowych w rurach ekranowych kotłów energetycznych. Nawet w kotłach nadkrytycznych, w których grubość ścianek rur ekranowych dochodzi do 8 mm, zachodzi konieczność stosowania mimośrodowych wstawek termometrycznych.

W rozdziale wyprowadzono wzory umożliwiające wyznaczenie współczynnika opromieniowania na powierzchni zewnętrznej rury mimośrodowej. Wyniki obliczeń za pomocą wzorów analitycznych porównano z wynikami otrzymanymi za pomocą programu ANSYS. Rozkład radiacyjnego współczynnika wnikania ciepła jest niezbędny do wyznaczenia rozkładu temperatury w rurach mimośrodowych, w tym we wstawkach termometrycznych stosowanych do pomiaru lokalnego obciążenia cieplnego na ścianach komór paleniskowych kotłów. Współczynnik opromieniowania jest jedną z wielkości wykorzystywanych w obliczeniach przedstawionych w rozdziale 6.



**Rys. 5.1.** Przykład pomiaru obciążenia cieplnego za pomocą mimośrodowej wstawki termometrycznej: a) wstawka termometryczna, b) rura ekranowa, 1-5 – punkty zamocowania termoelementów do pomiaru temperatury metalu.

Za pomocą wstawek termometrycznych wyznaczane jest obciążenie cieplne rur ekranowych  $q_m$ , współczynnik wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni wstawki  $\alpha_w$  oraz temperatura czynnika wewnątrz wstawki  $T_{cz}$ . Do wyznaczenia wymienionych parametrów, zwykle za pomocą metod iteracyjnych, niezbędne jest wyznaczenie kąтового współczynnika opromieniowania, definiującego wymianę ciepła pomiędzy płomieniem w komorze spalania a wstawką termometryczną.

Przykład wstawki pomiarowej służącej do identyfikacji warunków brzegowych w rurach ekranowych przedstawiono na rysunku 5.1. Na podstawie pomiaru temperatury ścianki wstawki w czterech punktach usytuowanych w czołowej części rury oraz pomiaru temperatury na zewnętrznej powierzchni rury od strony izolacji ekranu kotła wyznaczane jest lokalne obciążenie cieplne  $q_m$ , współczynnik wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni wstawki  $\alpha_w$  oraz temperatura czynnika  $T_{cz}$ .

Promień powierzchni zewnętrznej rury mimośrodowej  $r_o$  mierzony od punktu  $O$  (rys. 5.3) określony jest wzorem:

$$r_o = e \cos \varphi + \sqrt{b^2 - e^2 (\sin \varphi)^2} \quad (5.1)$$

Pomiędzy kątami  $\varphi_1$  i  $\varphi$  zachodzi zależność:

$$\varphi_1 = \arcsin \left[ \frac{\left( e \cos \varphi + \sqrt{b^2 - (e \sin \varphi)^2} \right) \sin \varphi}{b} \right], \quad \varphi_1 \leq \frac{\pi}{2}, \quad (5.2)$$

$$\varphi_1 = \pi - \arcsin \left[ \frac{\left( e \cos \varphi + \sqrt{b^2 - (e \sin \varphi)^2} \right) \sin \varphi}{b} \right], \quad \frac{\pi}{2} \leq \varphi_1 \leq \pi \quad (5.3)$$

Gęstość strumienia ciepła na zewnętrznej powierzchni rury określona jest wzorem:

$$q(\varphi) = q_m \psi(\varphi). \quad (5.4)$$

Kątowy współczynnik opromieniowania  $\psi(\varphi)$  określa jaką część radiacyjnego strumienia ciepła wypromieniowana przez elementarną powierzchnię usytuowaną na zewnętrznej powierzchni rury

dociera do płomienia. Przyjmuje się przy tym, że powierzchnia płomienia jest nieskończoną płaszczyzną. Kątowy współczynnik opromieniowania  $\psi(\varphi)$  obliczany jest ze wzoru:

$$\psi = \frac{1}{2}(\sin \delta_1 + \sin \delta_2), \quad (5.5)$$

gdzie:

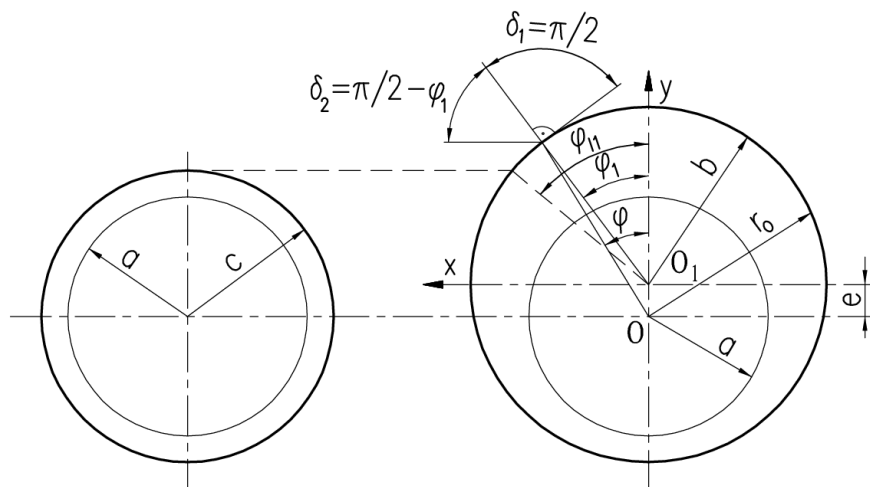
kąty  $\delta_1$  i  $\delta_2$  uwidocznione są na rysunkach 5.3, 5.5, 5.7, 5.9 i 5.11.

Najpierw zostanie określony współczynnik opromieniowania dla kąta  $\varphi$  zawartego w przedziale  $0 \leq \varphi_1 \leq \varphi_{11}$ :

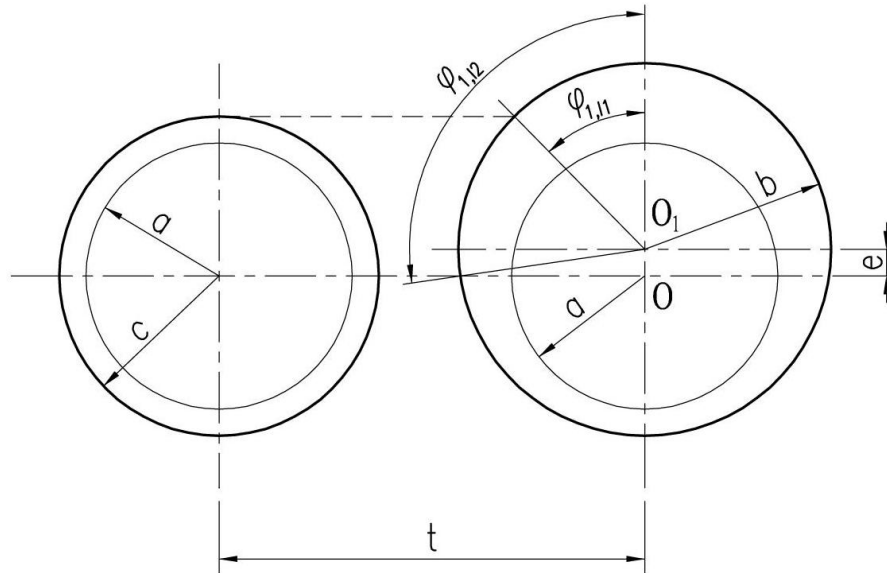
$$\psi = \frac{1 + \cos \varphi_1}{2}, \quad 0 \leq \varphi_1 \leq \varphi_{11}. \quad (5.6)$$

Kąt graniczny  $\varphi_{11}$  (rys.5.2) wyznaczany jest ze wzoru:

$$\varphi_{11} = \arccos \frac{c-e}{b} \quad (5.7)$$



**Rys. 5.2.** Schemat ilustrujący wyznaczenie współczynnika opromieniowania w przedziale  $0 \leq \varphi_1 \leq \varphi_{1,11}$ .



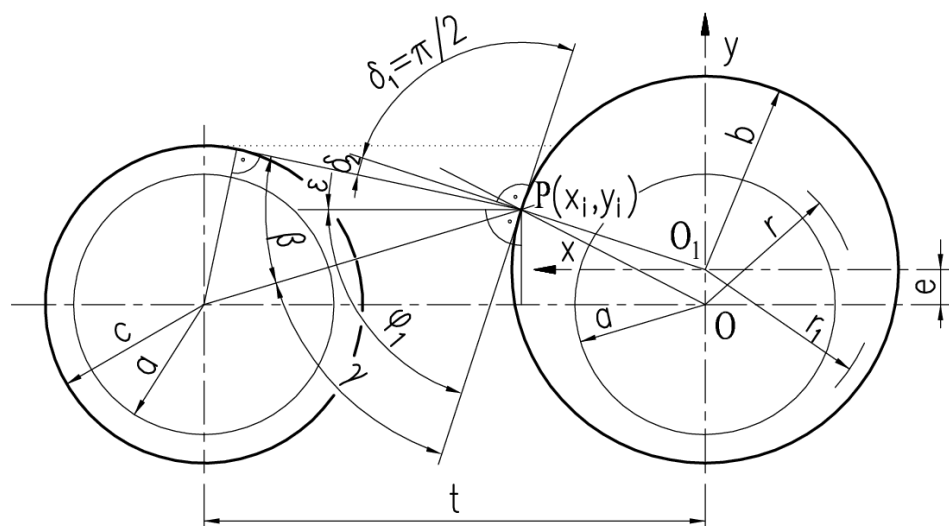
**Rys. 5.3.** Kąty graniczne  $\varphi_{1,1}$  i  $\varphi_{1,2}$ .

Następnie wyznaczony zostanie współczynnik opromieniowania w przedziale  $\varphi_{11} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{12}$ .

Kąt  $\varphi_{12}$  wyznaczany jest ze wzoru (3)  $\varphi_{12} = \varphi_1(\varphi = \pi/2)$ . Współczynnik  $\psi$  obliczany jest ze wzoru (5) z uwzględnieniem następujących zależności (rys. 4):

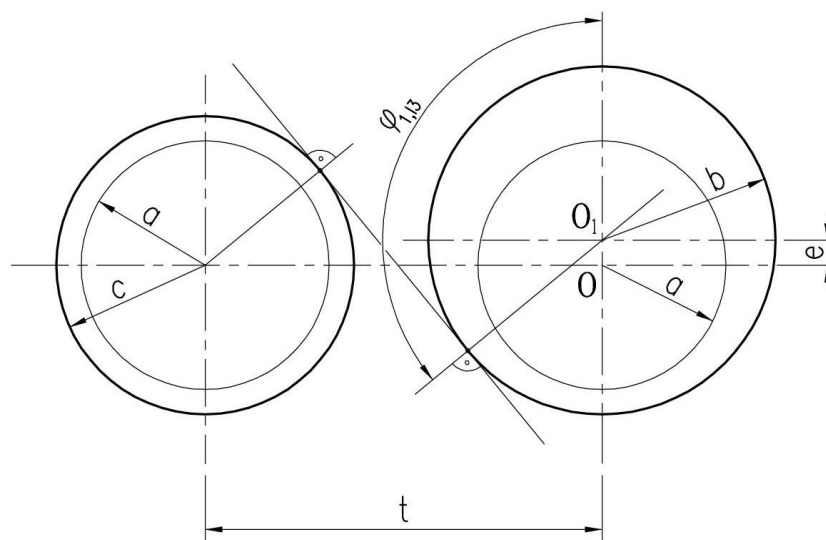
$$\delta_1 = \frac{\pi}{2}, \quad \delta_2 = \frac{\pi}{2} - (\varepsilon + \varphi_1), \quad \varepsilon = \beta + \gamma - \frac{\pi}{2}, \quad x_i = b \sin \varphi_1, \quad y_i = b \cos \varphi_1$$

$$\beta = \arcsin \frac{c}{\sqrt{(t-x_i)^2 + (y_i+e)^2}}, \quad \gamma = \arcsin \frac{t-x_i}{\sqrt{(t-x_i)^2 + (y_i+e)^2}}, \quad \varphi_{11} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{12}. \quad (5.8)$$



**Rys. 5.4.** Schemat ilustrujący wyznaczenie współczynnika opromieniowania w przedziale  $\varphi_{1,1} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{1,2}$ .

Następnie współczynnik  $\psi(\varphi)$  obliczany jest w przedziale:  $\varphi_{1,2} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{1,3}$  (rys. 5.5).



**Rys. 5.5.** Kąt graniczny  $\varphi_{1,3}$ .

Kąt graniczny  $\varphi_{1,3}$  określony jest wzorem (rys. 5.6):

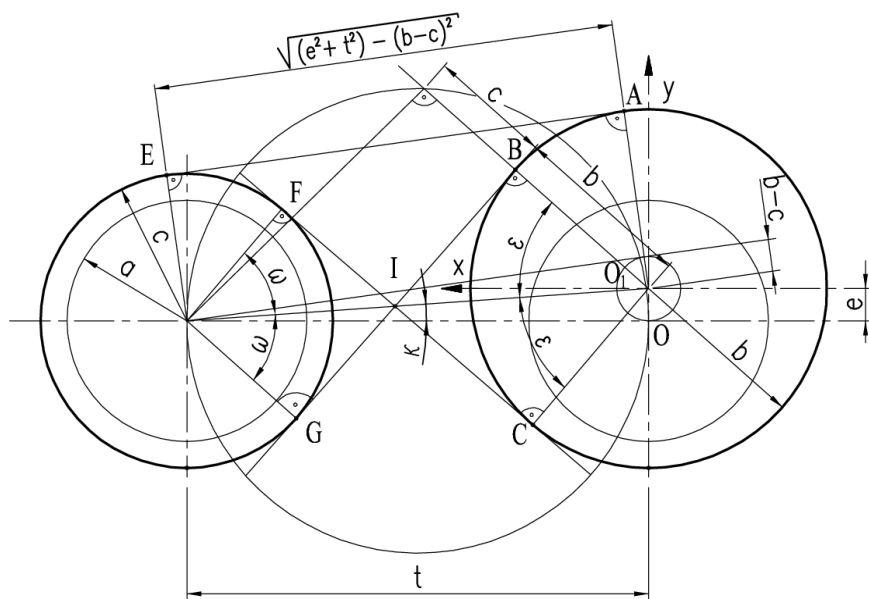
$$\varphi_{1,3} = \frac{\pi}{2} + \kappa + \omega, \quad (5.9)$$

gdzie:

kąty  $\kappa$  i  $\omega$  określone są wyrażeniami:

$$\kappa = \arctan \frac{b-c}{t}, \quad (5.10)$$

$$\omega = \arccos \frac{b+c}{\sqrt{t^2 + e^2}}. \quad (5.11)$$



**Rys. 5.6.** Schemat ilustrujący wyznaczenie średniego współczynnika opromieniowania  $\Psi_{bs}$  tylnej izolowanej powierzchni ekranu.

Współczynnik  $\psi$  wyznaczany jest w przedziale  $\varphi_{1,4} \leq \varphi_1 \leq \frac{\pi}{2}$  ze wzoru (rys. 5.7):

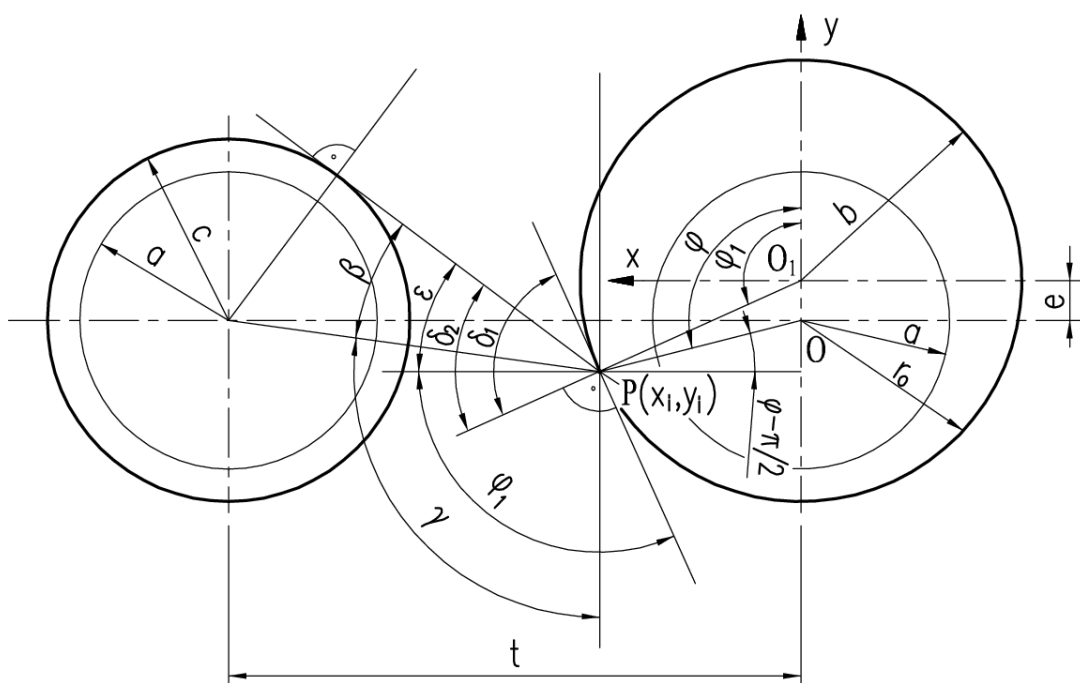
$$\psi = \frac{1}{2}(\sin \delta_2 - \sin \delta_1), \quad \varphi_{1,4} \leq \varphi_1 \leq \frac{\pi}{2}, \quad (5.12)$$

gdzie:

$$\delta_1 = \frac{\pi}{2}, \quad (5.13)$$

$$\delta_2 = \varepsilon + \varphi_1 - \frac{\pi}{2}, \quad (5.14)$$

$$\varepsilon = \beta + \gamma - \frac{\pi}{2} \quad (5.15)$$



**Rys. 5.7.** Schemat ilustrujący wyznaczanie współczynnika opromieniowania w przedziale  $\varphi_{1,2} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{1,3}$ .

$$\beta = \arcsin \frac{c}{\sqrt{(t-x_i)^2 + (y_i+e)^2}}, \quad (5.16)$$

$$\gamma = \pi - \arcsin \frac{t-x_i}{\sqrt{(t-x_i)^2 + (y_i+e)^2}}, \quad (5.17)$$



$$x_i = b \sin \varphi_1, \quad (5.18)$$

$$y_i = b \cos \varphi_1. \quad (5.19)$$

Średnią gęstość strumienia ciepła  $q_{bs}$  docierającego od płomienia do tylnej izolowanej płaszczyzny poszycia kotła wyznacza się za pomocą metody naciągniętej nici sformułowanej przez Hotella [1]. Zgodnie z tą metodą średnią gęstość strumienia ciepła  $q_{bs}$  oblicza się ze wzoru (rys. 5.6):

$$\psi_{bs} = \frac{1}{2t} [(FC + BG) - (FG + BC)]. \quad (5.20)$$

Po wyznaczeniu długości odcinków FC i BG oraz długości łuków FG i BC we wzorze (5.20), średnią gęstość strumienia ciepła  $q_{bs}$  można wyznaczyć z wyrażenia:

$$q_{bs} = q_m \psi_{bs}, \quad (5.20)$$

gdzie:

współczynnik  $\psi_{bs}$  określony jest wzorem:

$$\psi_{bs} = \frac{b+c}{t} (\tan \omega - \omega), \quad (5.21)$$

gdzie:

$$\tan \omega = \frac{\sqrt{e^2 + t^2 - (b+c)^2}}{b+c} \quad (5.22)$$

W przypadku równych średnic wstawki termometrycznej i rury ekranowej, tj. gdy  $e = 0$  i  $b = c$ , wzór (22) przyjmuje postać [2]:

$$\tan \omega = \sqrt{\left(\frac{t}{2b}\right)^2 - 1}. \quad (5.23)$$

W przedziale  $\varphi_{1,4} \leq \varphi_1 \leq \frac{\pi}{2}$  współczynnik opromieniowania, uwzględniający promieniowanie tylnej izolowanej powierzchni określony jest wzorem :

$$\psi = \psi_{bs} \cdot \frac{1}{2} (\sin \delta_2 - \sin \delta_1), \quad \varphi_{1,4} \leq \varphi_1 \leq \frac{\pi}{2} \quad (5.24)$$

gdzie:

kąt graniczny  $\varphi_{1,4}$  oblicza się z wyrażenia:

$$\psi_{1,4} = \frac{\pi}{2} - (\omega - \kappa). \quad (5.25)$$

Kąty  $\delta_1$  i  $\delta_2$  określone są wzorami (rys. 9):

$$\delta_1 = \frac{\pi}{2} + \varepsilon - \varphi_1, \quad (5.26)$$

$$\delta_2 = \frac{\pi}{2}, \quad (5.27)$$

gdzie:

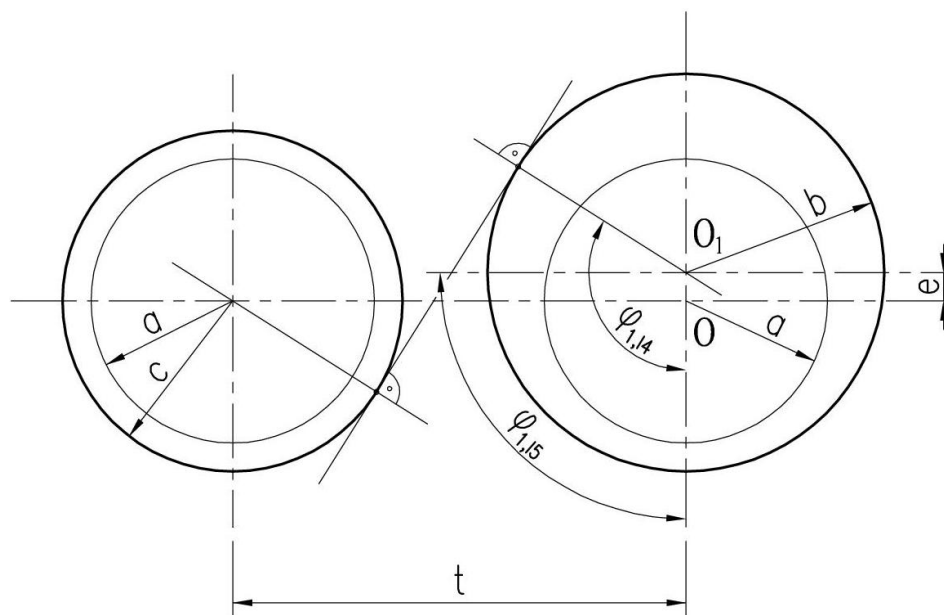
$$\varepsilon = \beta + \gamma - \frac{\pi}{2}, \quad (5.28)$$

$$\beta = \arcsin \frac{c}{\sqrt{(t-x_i)^2 + (y_i+e)^2}}, \quad (5.29)$$

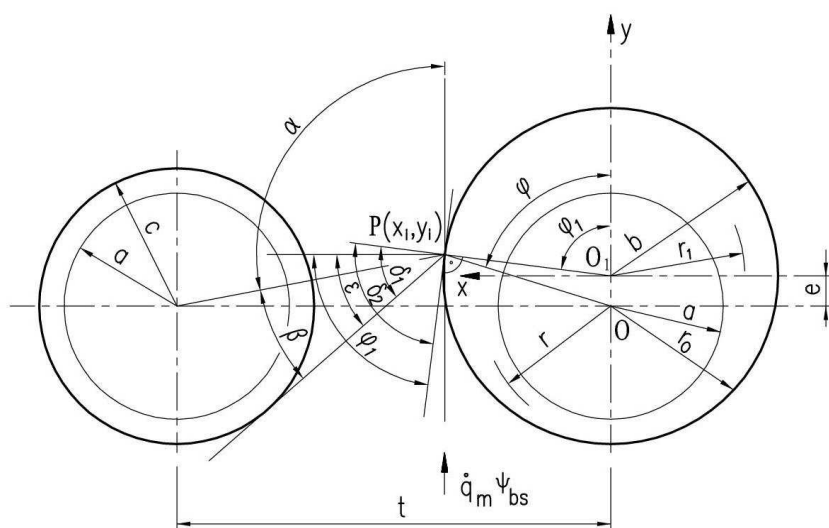
$$\gamma = \pi - \arcsin \frac{t-x_i}{\sqrt{(t-x_i)^2 + (y_i+e)^2}}, \quad (5.30)$$

$$x_i = b \sin \varphi_1, \quad (5.31)$$

$$y_i = b \cos \varphi_1. \quad (5.32)$$



Rys. 5.8. Kąty graniczne  $\varphi_{1,14}$  i  $\varphi_{1,15}$ .



Rys. 5.9. Schemat ilustrujący wyznaczenie współczynnika opromieniowania w przedziale  $\varphi_{1,14} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{1,15}$

Współczynnik opromieniowania  $\psi$  w przedziale  $\varphi_{1,15} \leq \varphi \leq \pi$ , gdzie  $\varphi_{1,15} = \pi/2$ , wyznaczany jest ze wzoru:

$$\psi = \psi_{bs} \cdot \frac{1}{2} (\sin \delta_1 + \sin \delta_2), \quad \varphi_{1,15} \leq \varphi \leq \pi, \quad (5.33)$$

gdzie:

$$\delta_1 = \varphi_1 - \varepsilon - \frac{\pi}{2}, \quad (5.34)$$

$$\delta_2 = \frac{\pi}{2}, \quad (5.35)$$

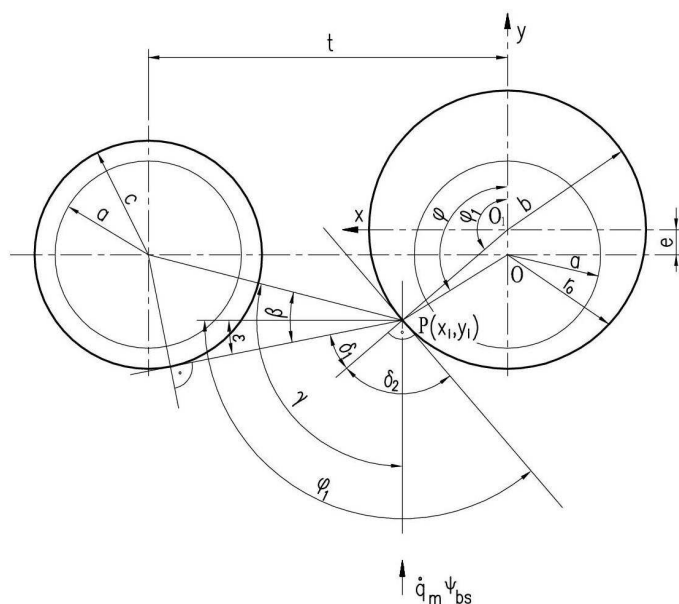
$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} - (\gamma - \beta), \quad (5.36)$$

$$\beta = \arcsin \frac{c}{\sqrt{(t-x_i)^2 + (y_i+e)^2}}, \quad (5.37)$$

$$\gamma = \pi - \arcsin \frac{t-x_i}{\sqrt{(t-x_i)^2 + (y_i+e)^2}}, \quad (5.38)$$

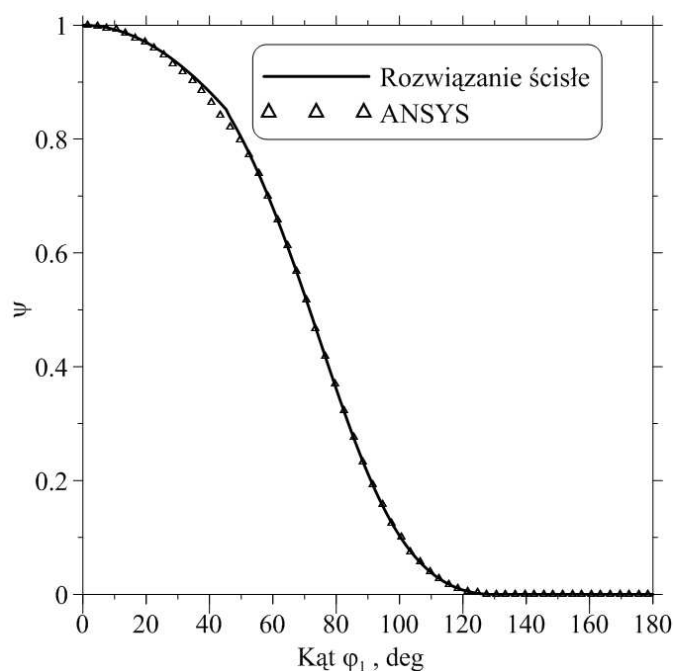
$$x_i = b \cos \left( \varphi_1 - \frac{\pi}{2} \right), \quad (5.39)$$

$$y_i = -b \sin \left( \varphi_1 - \frac{\pi}{2} \right). \quad (5.40)$$

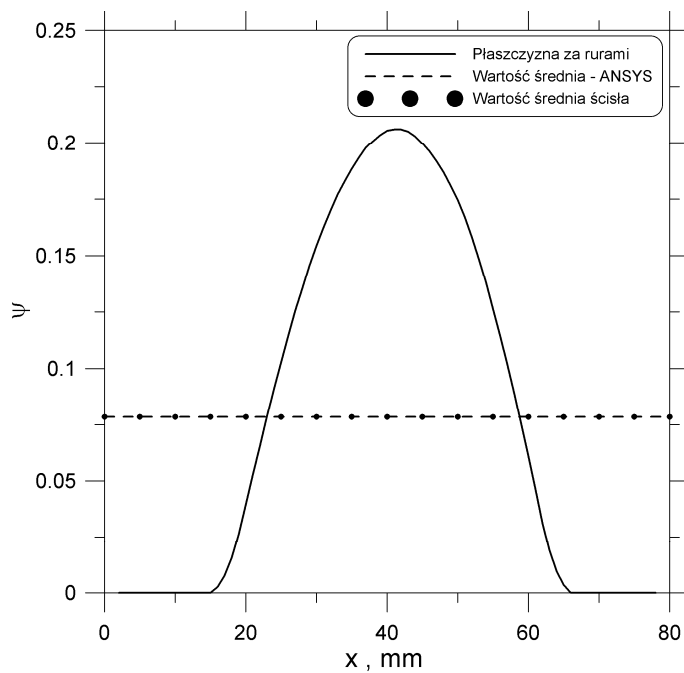


**Rys. 5.10.** Schemat ilustrujący wyznaczenie współczynnika opromieniowania w przedziale  $\varphi_{1,15} \leq \varphi \leq \pi$ .

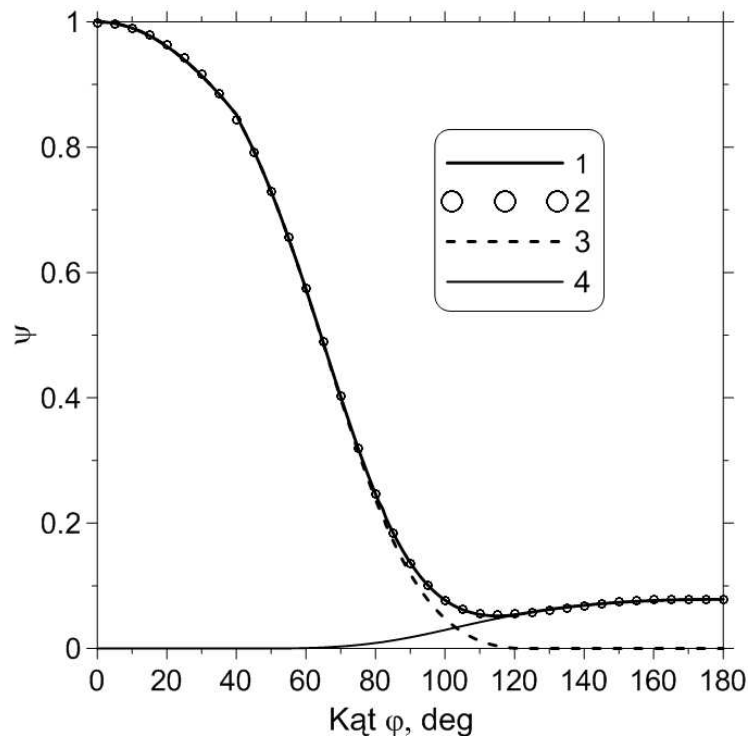
Wyniki obliczeń współczynnika opromieniowania za pomocą wyprowadzonych wzorów przedstawiono na rysunkach 5.11-5.13.



**Rys. 5.11.** Porównanie współczynnika opromieniowania na zewnętrznej powierzchni wstawki, obliczonego za pomocą wzorów analitycznych ścisłych i za pomocą programu ANSYS dla radiacyjnej wymiany ciepła pomiędzy płomieniem a wstawką pomiarową.



**Rys. 5.12.** Rozkład współczynnika opromieniowania  $\psi$  na izolowanej płaskiej powierzchni ekranu przylegającej do tylnej powierzchni rur wyznaczony za pomocą programu ANSYS.



**Rys. 5.13.** Rozkład współczynnika opromieniowania  $\Psi(\varphi)$  na połowie obwodu wstawki:

1 – współczynnik sumaryczny uwzględniający promieniowanie płomienia i płaszczyzny przylegającej do tylnej powierzchni rur ekranowych (obmurza), 2 – aproksymacja współczynnika sumarycznego za pomocą wielomianu trygonometrycznego siódmego stopnia, 3 – współczynnik uwzględniający tylko promieniowanie płomienia, 4 – współczynnik uwzględniający tylko promieniowanie obmurza.

Współczynnik kątowy określający radiacyjną wymianę ciepła pomiędzy płomieniem a rurą obliczony za pomocą programu ANSYS, jest dla czołowej części rury, nieco mniejszy od wartości otrzymanej za pomocą wzoru ścisłego. Wynika to ze zbyt małej szerokości płaszczyzny symulującej płomień. W celu uzyskania lepszej dokładności, szerokość tej płaszczyzny powinna być większa.

Wartość średnia współczynnika opromieniowania wyznaczonego ze wzoru ścisłego (5.20) wynosi:

$\psi_{bs} = 0,07843$ , a średnia wartość  $\psi_{bs}$  obliczona ze wzoru:

$$\psi_{bs} = \frac{1}{t} \int_0^t \psi(x) dx \quad (5.41)$$

wynosi  $\psi_{bs} = 0,07849$ . Rozkład  $\Psi(x)$  występujący w całce (5.41) został wyznaczony za pomocą programu ANSYS (rys. 5.12). Względna różnica pomiędzy wartością  $\psi_{bs}$  wyznaczoną za pomocą programu ANSYS i wartością wyznaczoną za pomocą wzoru ścisłego wynosi tylko 0,076%.

Wyprowadzone wzory umożliwiają wyznaczenie radiacyjnej gęstości strumienia ciepła na obwodzie wstawki pomiarowej, charakteryzującej się większą średnicą niż średnice pozostałych rur ekranowych. Tylne tworzące rur ekranowych i wstawki pomiarowej leżą w jednej płaszczyźnie. Przedstawione wzory jako uniwersalne mogą być stosowane przy wyznaczaniu pola temperatury we wstawce termometrycznej mimośrodowej lub rurach ekranowych.

## **6. OKREŚLANIE STRUMIENIA CIEPŁA I WSPÓŁCZYNNIKA WNIKANIA DLA RUR EKRAKOWYCH PRZY POMOCY WSTAWKI MIMOŚRODOWEJ**

### **6.1. Podstawy teoretyczne działania wstawek mimośrodowych**

Wstawki mimośrodowe są stosowane, aby określić warunki brzegowe wymiany ciepła w ścianach ekranowych kotłów parowych. Wstawka jest zbudowana z krótkiego odcinka rury mimośrodowej, zawierającego cztery termoelementy ulokowane od strony komory paleniskowej. Piąty termoelement jest usytuowany na tylnej ścianie wstawki od strony izolacji kotła (rys. 5.1)

Warunki brzegowe na zewnętrznych i wewnętrznych powierzchniach wstawki będą wyznaczone w oparciu o pomiar temperatury wewnątrz wstawki. Cztery termopary o średnicy 1 mm, typu K, w osłonie są włożone do otworów biegnących równolegle do osi rur. Efekt wpływu ciepła przewodzonego od ściany kotła jest zminimalizowany, gdyż temperatura termopary nie zmienia się wraz z jej długością – otwory są izotermiczne. Termopara zamocowana na tylnej ścianie wstawki jest prowadzona w szczelinie wyciętej w nakładce osłaniającej. Nakładka ze stali austenitycznej o grubości 3 mm przyspawana do rury służy do ochrony termoelementu przed promieniowaniem płomienia. Termopara typu K w osłonie z nakładką mierzy temperaturę na tylnej ścianie wstawki. Temperatura ta jest prawie taka sama, jak temperatura mieszanki parowo-wodnej płynącej w jej wnętrzu. Przedstawiono metodę wyznaczania przejmowanego strumienia ciepła, współczynnika wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni rury i temperatury mieszanki parowo-wodnej wewnątrz ekranu kotła. Nieznane wielkości są oszacowane w oparciu o pomiar temperatury w kilku miejscach jako rozwiązanie zagadnienia odwrotnego przewodzenia ciepła. Nieliniowe zagadnienie najmniejszych kwadratów zostanie rozwiązane numerycznie, w oparciu o metodę Levenberga-Marquardta. Średnica opomiarowanej rury może być większa niż średnica rur ekranowych kotła. Współczynnik opromieniowania określający ilość przejmowanego ciepła na obwodzie wstawki mimośrodowej jest wyznaczony metodą analityczną i porównany z metodą numeryczną w oparciu o oprogramowanie ANSYS. Przedstawiona metoda obliczeń może być zatem użyta do oceny stopnia zapylenia powierzchni wewnętrznych ekranów lub ich stopnia zażużlenia. Metoda ta jest odpowiednia zarówno dla ekranów z rur gładkich, jak również dla membranowych ścian szczelnych. Warunki wymiany ciepła w rurach sąsiadujących nie mają wpływu na rozkład temperatury we wstawce mimośrodowej.

Na początku zostanie wyznaczony rozkład temperatury w przekroju poprzecznym mierzonej rury, tzn. zostanie rozwiązane zagadnienie proste wymiany ciepła. Linowe równanie wymiany ciepła może być rozwiązane przy użyciu metod analitycznych. Rozkład temperatury zostanie obliczony numerycznie przy użyciu metody elementów skończonych. Aby pokazać trafność



przybliżeń numerycznych, zostaną porównane wyniki metody numerycznej i analitycznej. Przyjęto następujące założenia:

- przewodność cieplna materiału wstawki się nie zmienia,
- współczynnik wnikania ciepła na powierzchni wewnętrznej, nie na obwodzie, pozostaje niezmienny,
- tył ściany ekranowej wraz ze wstawką jest zaizolowany,
- średnica zewnętrzna wstawki jest większa niż średnica rury ekranowej,
- powierzchnia zewnętrzna wstawki jest poddana jest promieniowaniu płomienia, zatem absorpcja ciepła na jej powierzchni jest nierównomierna.

Rozkład temperatury we wstawce mimośrodowej określa równanie przewodzenia ciepła:

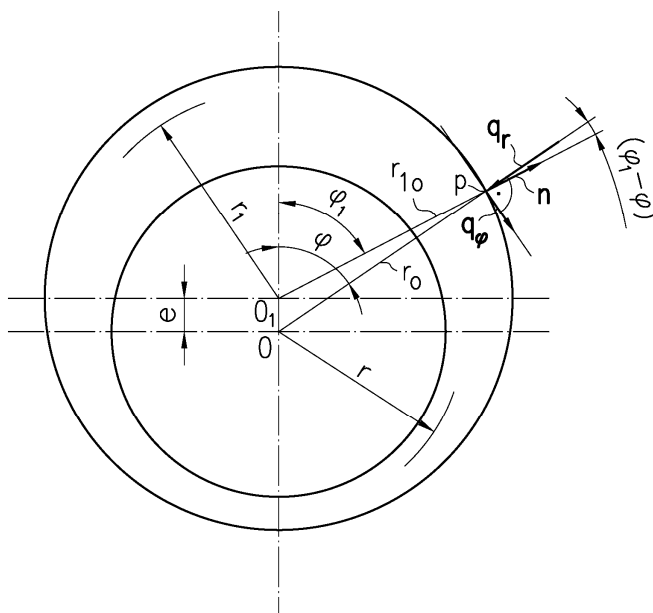
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{\lambda}{r} \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \right) = 0 \quad (6.1)$$

z następującymi warunkami brzegowymi:

$$\lambda \nabla \theta \cdot n \Big|_{r=r_0} = q_m \psi(\varphi) \quad (6.2)$$

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=a} = \alpha \theta \Big|_{r=a} \quad (6.3)$$

Współrzędne biegunowe pokazano na rys. 6.1



**Rys.6.1.** Przybliżenie warunków brzegowych na powierzchni zewnętrznej wstawki.

Lewa strona równania (6.2) może być przekształcona następująco:

$$\lambda \nabla \theta \cdot n \Big|_{r=r_0} = (q_r + q_{rs}) \cdot n \Big|_{r=r_0} = \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \cos(\varphi_1 - \varphi) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \sin(\varphi_1 - \varphi) \right] \Big|_{r=r_0} \quad (6.4)$$

Drugą część w równaniu (6.2) można pominąć i warunki brzegowe upraszczają się:

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \frac{q_m \psi(\varphi)}{\cos(\varphi_1 - \varphi)} \quad (6.5)$$

Strumień ciepła na obwodzie wstawki może być przybliżony przy pomocy szeregu Fouriera:

$$\frac{q_m \psi(\varphi)}{\cos(\varphi_1 - \varphi)} = q_0 + \sum_{n=1}^{\infty} q_n \cos(n\varphi) \quad (6.6)$$

gdzie:

$$q_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{q_m \psi(\varphi)}{\cos(\varphi_1 - \varphi)} d\varphi, \quad q_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{q_m \psi(\varphi)}{\cos(\varphi_1 - \varphi)} \cos(n\varphi) d\varphi, \quad n = 1, \dots \quad (6.7)$$

Problem warunków brzegowych (6.1-6.3) został rozwiązany poprzez rozdzielnie zmiennych, otrzymujemy wówczas:

$$\theta(r, \varphi) = A_0 + B_0 \ln r + \sum_{n=1}^{\infty} (C_n r^n + D_n r^{-n}) \cos n\varphi. \quad (6.8)$$

gdzie:

$$A_0 = \frac{q_0 r_0(\varphi)}{\lambda} \left( \frac{1}{Bi} - \ln a \right), \quad (6.9)$$

$$B_0 = \frac{q_0 r_0(\varphi)}{\lambda}, \quad (6.10)$$

$$C_n = \frac{q_n r_0(\varphi)}{\lambda} \frac{\frac{1}{n} u^n (Bi + n) \frac{1}{\alpha^n}}{Bi(u^{2n} + 1) + n(u^{2n} - 1)}, \quad (6.11)$$

$$D_n = \frac{q_n r_0(\varphi)}{\lambda} \frac{\frac{1}{n} u^n (Bi - n) \frac{1}{\alpha^n}}{Bi(u^{2n} + 1) + n(u^{2n} - 1)}, \quad (6.12)$$

Stosunek średnicy zewnętrznej do średnicy wewnętrznej wstawki mimośrodowej:

$u = u(\varphi) = r_o(\varphi)/a$  zależy od kąta  $\varphi$ , ponieważ promień zewnętrzny wstawki:

$$r_o = e \cos \varphi + \sqrt{b^2 - (e \sin \varphi)^2} \quad (6.13)$$

jest funkcją kąta  $\varphi$ .

Równanie (6.8) może być użyte do obliczenia temperatury kiedy warunki brzegowe są znane.

W zagadnieniu odwrotnym przewodzenia ciepła zostaną wyznaczone trzy parametry [24, 26]:

- strumień ciepła przejmowanego przez powierzchnię ściany:  $x_1 = q_m$ ,
- współczynnik wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni rury:  $x_2 = h$ ,
- temperatura mieszanki parowo-wodnej:  $x_3 = T_f$ .

Te parametry mogą być wyznaczone w oparciu o pomiar temperatury ścianki w  $m$  punktach  $(r_i, \varphi_i)$ :

$$T(r_i, \varphi_i) = f_i, \quad i = 1, \dots, m, \quad m \geq 3. \quad (6.14)$$

Ogólnie nieznane parametry:  $x_1, \dots, x_n$  są wyznaczone poprzez minimalizowanie sumy kwadratów:

$$S = (\mathbf{f} - \mathbf{T}_m)^T (\mathbf{f} - \mathbf{T}_m), \quad (6.15)$$

gdzie:

$\mathbf{f} = (f_1, \dots, f_m)^T$  jest wektorem mierzonych temperatur a  $\mathbf{T}_m = (T_1, \dots, T_m)^T$  to wektor temperatur obliczonych  $T_i = T(r_i, \varphi_i)$ ,  $i = 1, \dots, m$ .

Parametry  $x_1 \dots x_n$ , dla których suma (6.15) jest minimalna są wyznaczone przy użyciu metody Levenberga-Marquardta [5]. Parametry  $\mathbf{x}$  są obliczane przy użyciu następującej iteracji:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \boldsymbol{\delta}^{(k)}, \quad k = 0, 1, \dots \quad (6.16)$$

gdzie:

$$\boldsymbol{\delta}^{(k)} = \left[ \left( \mathbf{J}_m^{(k)} \right)^T \mathbf{J}_m^{(k)} + \mu^{(k)} \mathbf{I}_n \right]^{-1} \left( \mathbf{J}_m^{(k)} \right)^T \left[ \mathbf{f} - \mathbf{T}_m \left( \mathbf{x}^{(k)} \right) \right]. \quad (6.17)$$

Jakobian  $\mathbf{J}_m$  jest określony następująco:

$$\mathbf{J}_m = \frac{\partial \mathbf{T}_m(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^T} = \left[ \left( \frac{\partial T_i(\mathbf{x})}{\partial x_j} \right) \right]_{m \times n} \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n. \quad (6.18)$$

Symbol  $\mathbf{I}_n$  oznacza macierz tożsamą o wymiarach  $n \times n$ , a  $\mu^{(k)}$  jest współczynnikiem, który zmienia się zgodnie z algorytmem przedstawionym przez Levenberga-Marquardta.

Górny indeks  $T$  oznacza macierz transponowaną. Rozkład temperatury  $T(r, \varphi, \mathbf{x}^{(k)})$  jest obliczony metodą iteracyjną, przy użyciu równania (6.8). Po kilku iteracjach otrzymujemy zbieżne wyniki.

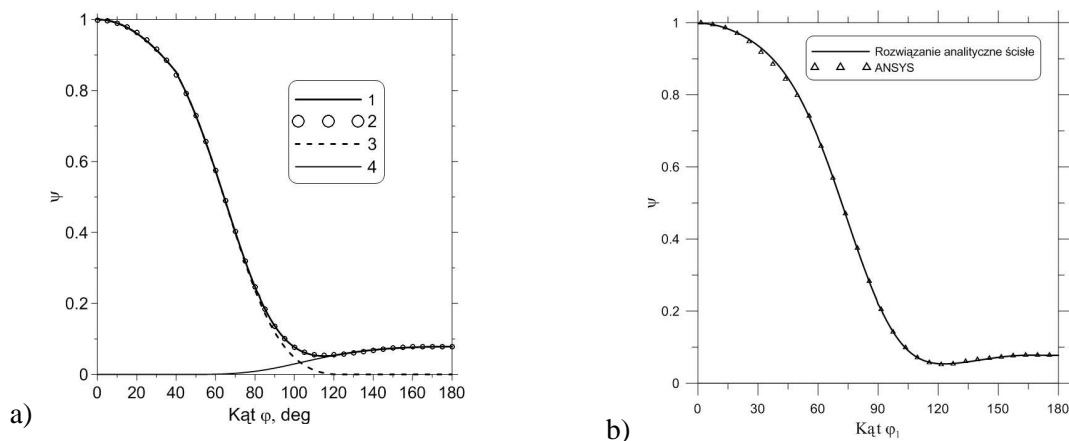
## 6.2. Obliczenia i testy

Na początku zostanie przedstawiony przykład obliczeniowy. Dane eksperymentalne są wygenerowane przy użyciu analitycznej formuły (6.8). Rozpatrywana jest ściana rurowa z następującymi parametrami (rys. 6.1):

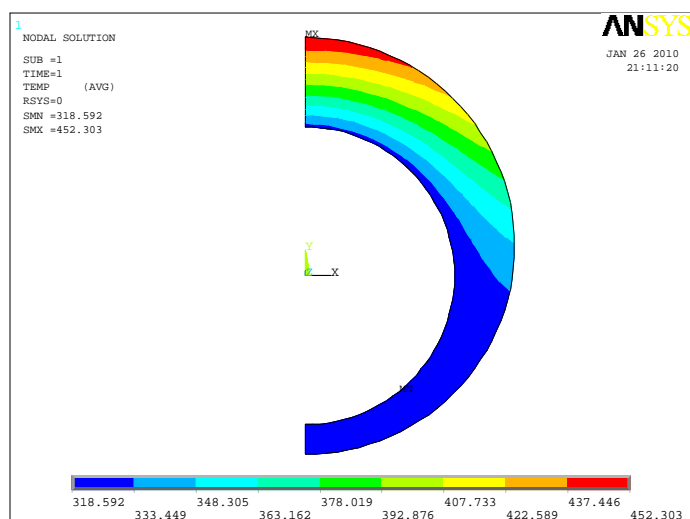
- promień wewnętrzny  $a = 25$  mm,
- promień wewnętrzny  $b = 35$  mm,
- podziałka ściany rurowej  $s = 80$  mm,
- współczynnik przewodzenia  $\lambda = 28,5$  W/(m·K),
- strumień ciepła przejmowanego  $q_m = 200\,000$  W/m<sup>2</sup>,
- współczynnik wnikania ciepła  $\alpha = 30\,000$  W/(m<sup>2</sup>·K),
- temperatura czynnika  $T_f = 318^{\circ}$  C.

Współczynnik opromieniowania dla zewnętrznej powierzchni ściany rurowej został określony analitycznie i numerycznie przy użyciu metody elementów skończonych. Zmiany współczynnika opromieniowania na obwodzie pokazano na rys. 6.2a. Zgodność obliczeń analitycznych i numerycznych obrazuje rysunek 6.2b. Zgodność temperatur na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni wstawki, obliczona metodą analityczną i numeryczną, jest zadowalająca (rys. 6.4). Te drobne różnice pomiędzy metodą analityczną i metodą elementów skończonych są spowodowane przez aproksymację warunków brzegowych (6.5). Rozkład temperatury w przekroju wstawki pokazano na rys. 6.3. Przy użyciu równania (6.8) wygenerowano następujące wartości temperatur:

$$f_1 = 437.98^{\circ}\text{C}, f_2 = 434.47^{\circ}\text{C}, f_3 = 383.35^{\circ}\text{C}, f_4 = 380.70^{\circ}\text{C}, f_5 = 321.58^{\circ}\text{C}.$$

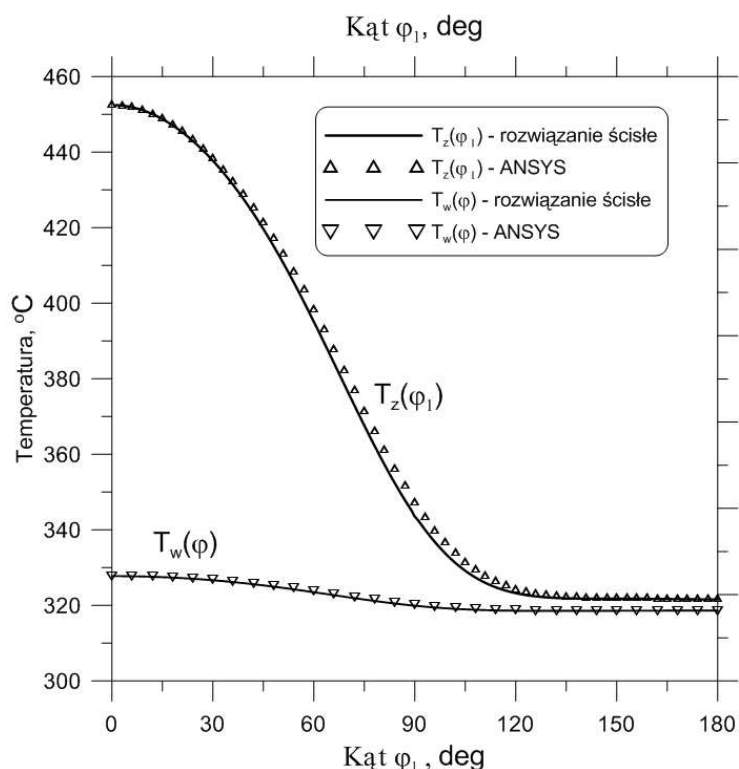


**Rys. 6.2.** Współczynnik opromieniowania związany z radiacyjną wymianą ciepła pomiędzy elementarną powierzchnią wstawki i płomieniem (a): 1 – ogólny współczynnik opromieniowania uwzględniający promieniowanie od paleniska i parametry kotła, 2 – przybliżenie przy pomocy szeregu Fouriera siódmego stopnia, 3 – dokładny współczynnik opromieniowania dla promieniowania paleniska, 4 – współczynnik opromieniowania dla parametrów kotła (b) porównania współczynnika opromieniowania obliczonego metodą dokładną i metodą elementów skończonych.



**Rys. 6.3.** Obliczony rozkład temperatury [ $^{\circ}\text{C}$ ] na przekroju wstawki

$$q_m = 200000 \text{ W/m}^2, \alpha = 30000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}), T_{cz} = 318^{\circ} \text{C}.$$



**Rys. 6.4.** Rozkład temperatury na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej wstawki, wyznaczony metodą analityczną i metodą elementów skończonych.

Przy użyciu zaproponowanej metody otrzymano następujące rezultaty:

$$q_m^* = 200000,35 \frac{W}{m^2}, \alpha^* = 30001,56 \frac{W}{m^2 K}, T_{cz}^* = 318^\circ C$$

Jest tylko mała różnica pomiędzy otrzymanymi wartościami w wartościami wprowadzonymi. Najwyższa temperatura występuje się w wierzchołku wstawki (rys. 6.3 i 6.4).

Temperatura powierzchni wewnętrznej wstawki jest tylko kilka stopni wyższa od temperatury nasycenia dla mieszanki parowo-wodnej. Skoro strumień ciepła na ścianie tylnej jest mały, to przepływ ciepła po obwodzie jest znaczący. Termopara na tylnej ścianie wstawki wskazuje temperaturę 2-4°C powyżej temperatury nasycenia. Dlatego też piąta termopara może być przymocowana na stronie nieogrzewanej i zastosowana do mierzenia temperatury mieszanki parowo-wodnej płynącej wewnątrz rury.

### 6.3. Badania eksperymentalne

W drugim przykładzie przedstawione zostaną wyniki eksperymentalne. Punkty pomiarowe zamontowano na kotle o mocy 50 MW opalany pyłem węgla kamiennego. Mierzone na wysokości 19,2 m temperatury pokazano na rys. 6.5. Wstawki pomiarowe wykonano ze stali

węglowej w gatunku 20G, dla której współczynnik przewodzenia. zależy od temperatury. można określić wzorem:

$$\lambda(T) = 53,26 - 0,02376224T - 8,67133 \cdot 10^{-6}T^2, \quad (6.19)$$

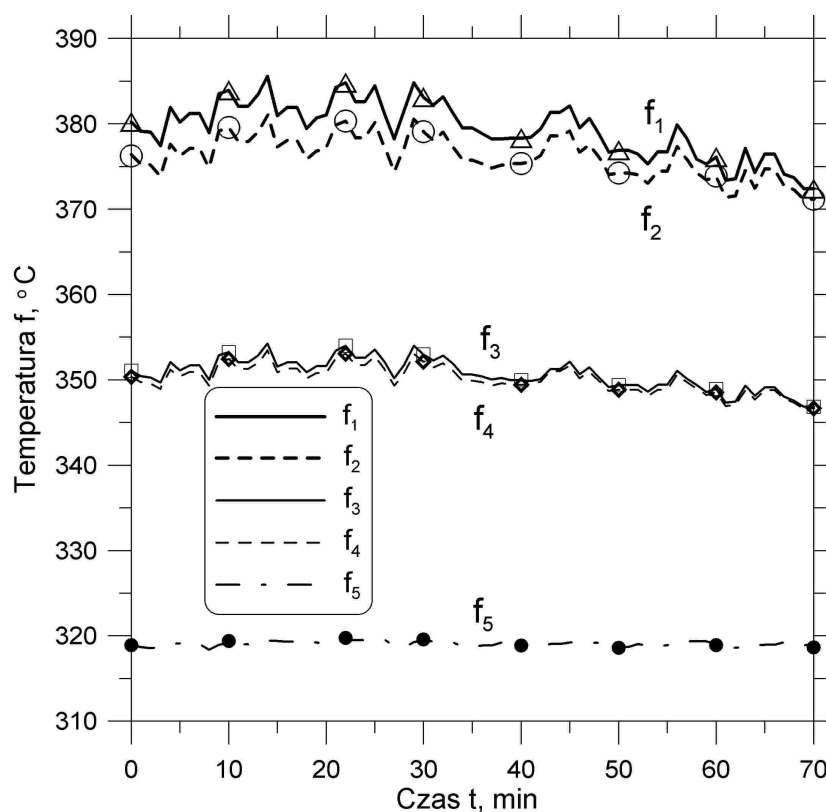
w którym temperatura  $T$  jest wyrażona w  $^{\circ}\text{C}$ , a współczynnik przewodzenia w  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

Nieznane parametry zostały wyznaczone w ośmiu punktach czasowych, co pokazano na rys.6.5.

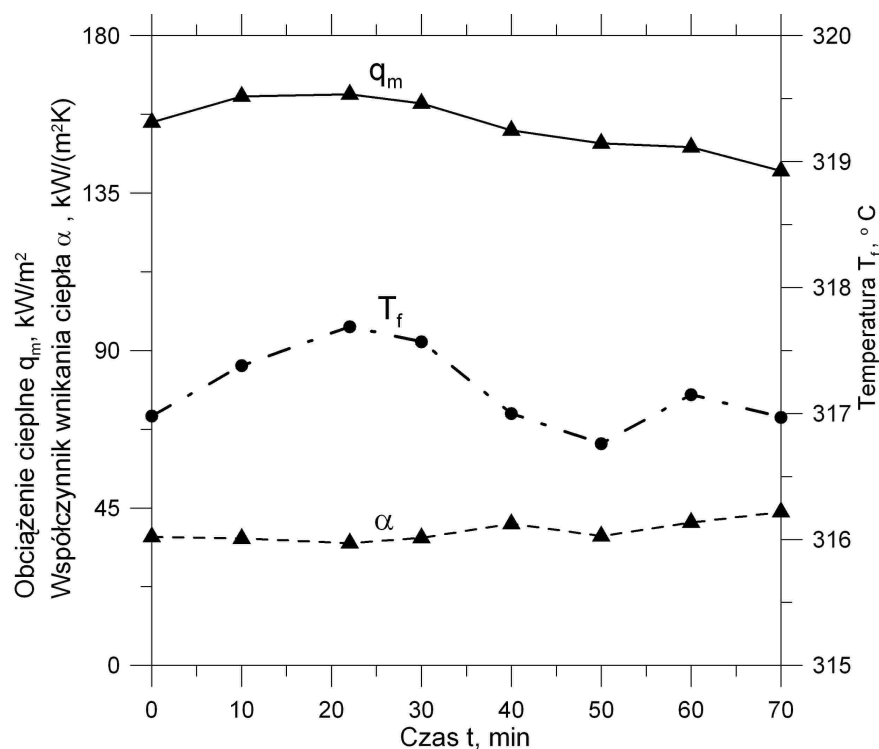
Odwrotna analiza została wykonana przyjmując, że współczynnik przewodzenia ciepła jest stały

i równy  $\lambda(\bar{T})$ , gdzie  $\bar{T} = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4)/4$  jest średnią temperaturą metalu w czołowej części rury.

Oszacowane parametry: strumień ciepła  $q_m$ , współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$ , i temperatura mieszanki parowo-wodnej  $T_{cz}$  są przedstawione na rys. 6.6.



**Rys. 6.5.** Zmierzona temperatura wstawki; znaczki pokazują temperaturę otrzymaną w wyniku analizy odwrotnej.



**Rys. 6.6.** Oszacowane parametry: obciążenie cieplne  $q_m$ , współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$  i temperatura mieszanki parowo wodnej  $T_{cz}$

Wstawka mimośrodowa pozwala na pracę w dłuższym okresie czasu w niszczącej atmosferze i wysokiej temperaturze kotła węglowego. Wstawki mogą być zatem użyte do monitorowania zażużłowania. Obecność zażużłowań na zewnętrznej powierzchni wstawek może być zatem wykryta. Sposób pomiaru zaprezentowany powyżej ma jedną zasadniczą zaletę w stosunku do pomiarów już znanych. Rozkład temperatury we wstawce nie jest zakłócany przez istniejące rury ekranu, ponieważ wstawka nie jest połączona ze ścianą szczelną przy pomocy płaskowników. W celu wyznaczenia szukanych parametrów wystarczy przeanalizować rozkład temperatury w przekroju wstawki.



## 7. POMIAR LOKALNEGO OBCIĄŻENIA CIEPLNEGO ŚCIANY KOMORY PALENISKOWEJ KOTŁA ZA POMOCĄ MIERNIKA GARDONA

### 7.1. Podstawy teoretyczne działania miernika Gardona

W rozdziale opisano teoretyczne podstawy działania cienkościennych czujników Gardona. Z uwagi na fakt, że w praktyce zastosowano czujnik w kształcie okrągłego krążka, skupiono się tylko na tego rodzaju konstrukcji.

Mierniki Gardona mają zastosowanie w praktyce przemysłowej zarówno do określenia strumienia ciepła przejmowanego na drodze promieniowania, jak również do wyznaczania współczynnika wnikania ciepła. Przy określaniu strumienia przejmowanego ciepła przyjmuje się założenie, że temperatura ośrodka emitującego ciepło jest znacznie wyższa od temperatury powierzchni czujnika, co pozwala przyjąć założenie, że gęstość strumienia ciepła na powierzchni czujnika jest stała. W praktyce założenie to jest bardzo dobrze spełnione, jeśli temperatura czujnika nie przekracza 600°C.

Mierniki Gardona mogą również służyć do wyznaczania współczynników wnikania na powierzchni ciała. Izotermiczność badanego ciała nie jest jednak tutaj zachowana, ponieważ temperatury czujnika w środku i na brzegu różnią się od siebie. Ta różnica temperatury została określona we wzorach, które zostaną poniżej przedstawione.

### 7.2. Pomiar gęstości strumienia przejmowanego ciepła

Równanie ustalonego przepływu ciepła dla miernika w kształcie krążka ma postać:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[ \lambda(T) r \frac{dT}{dr} \right] = -\frac{q_m}{L} \quad (7.1)$$

gęstość strumienia ciepła  $q$  zostanie wyznaczona przy pomocy pomiaru temperatury w punktach  $r = r_1$  i  $r = r_2$  przy założeniu, że pole temperatury jest kołowo symetryczne.

Warunki brzegowe (7.2) i równanie (7.1) pozwalają wyznaczyć strumień  $q$  oraz zależność  $T(r)$ :

$$\begin{aligned} T|_{r=r_1} &= f_1 \\ T|_{r=r_2} &= f_2 \\ \frac{dT}{dr}|_{r=0} &= 0 \end{aligned} \quad (7.2)$$

Równanie różniczkowe (7.1) zostanie sprowadzone do liniowego, wykorzystując podstawienie Kirchhoffa:

$$U = \int_0^T \lambda(T) dT \quad (7.3)$$

mamy zatem:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dU}{dr} \right) = -\frac{q_m}{L} \quad (7.4)$$

$$U|_{r=r_1} = U_1 \quad (7.5)$$

$$U|_{r=r_2} = U_2 \quad (7.6)$$

$$\left. \frac{dU}{dr} \right|_{r=0} = 0 \quad (7.7)$$

gdzie:

$$U_1 = \int_0^{f_1} \lambda(T) dT, \quad U_2 = \int_0^{f_2} \lambda(T) dT$$

Rozkład temperatury w czujniku wyznaczony z równania (7.4) z uwzględnieniem warunków brzegowych (7.5) i (7.7) wyrażony jest następująco:

$$U = -\frac{1}{4} \frac{q_m (r_2^2 - r_1^2)}{L} + U_1 \quad (7.8)$$

Z warunku brzegowego (7.6) otrzymujemy:

$$q = \frac{4(U_1 - U_2)L}{r_2^2 - r_1^2} \quad (7.9)$$

Jest to wzór wykorzystywany do obliczania gęstości strumienia ciepła na podstawie zmierzonych temperatur  $f_1$  i  $f_2$ .

Przewodność cieplną materiału czujnika (zwykle stali) można przybliżyć następująco:

$$\lambda(T) = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + \dots + c_n T^n \quad (7.10)$$

Współczynniki  $c_0, c_1, \dots, c_n$  są stałymi wyznaczanymi metodą najmniejszych kwadratów.

Zwykle bardzo dobrą dokładność aproksymacji  $\lambda(T)$  można uzyskać przy  $n \leq 3$ .

Przy założeniu (7.10)  $U(T)$  wyznaczone według wzoru (7.3) ma postać:

$$U(T) = c_0 T + \frac{1}{2} c_1 T^2 + \frac{1}{3} c_2 T^3 + \dots + \frac{1}{n+1} c_n T^{n+1} \quad (7.11)$$

Gdy przewodność cieplna jest liniową funkcją temperatury, tj. gdy  $n = 1$  we wzorze (7.10), wzór (7.9) sprowadza się do postaci:

$$q_m = \frac{4\lambda_{sr}(f_1 - f_2)L}{r_2^2 - r_1^2} \quad (7.12)$$

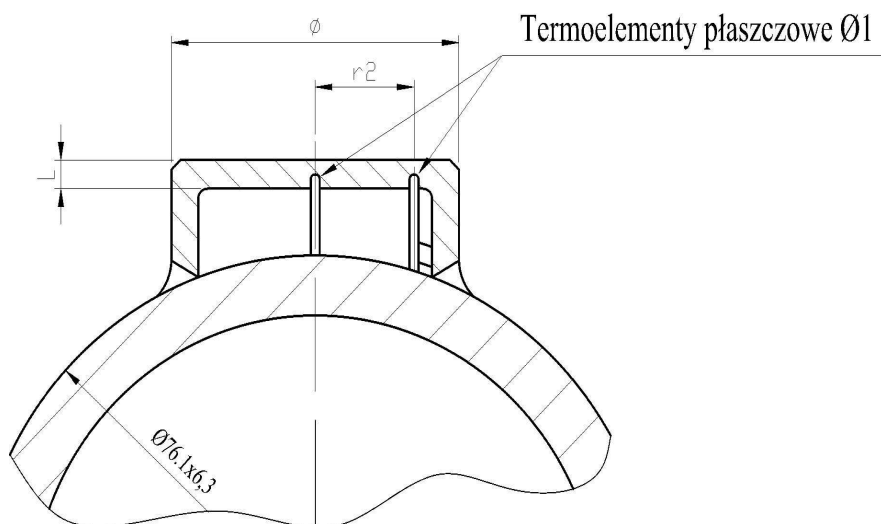
w którym:

$$\lambda_{sr} = c_0 + \frac{c_1}{2}(f_1 + f_2) = \frac{\lambda(f_1) + \lambda(f_2)}{2} \quad (7.13)$$

Jeżeli przyjmiemy  $\lambda = \lambda_0 = c_0 = const$  i  $r_1 = 0$  otrzymamy:

$$q_m = \frac{4\lambda_0(f_1 - f_2)L}{r_2^2} \quad (7.14)$$

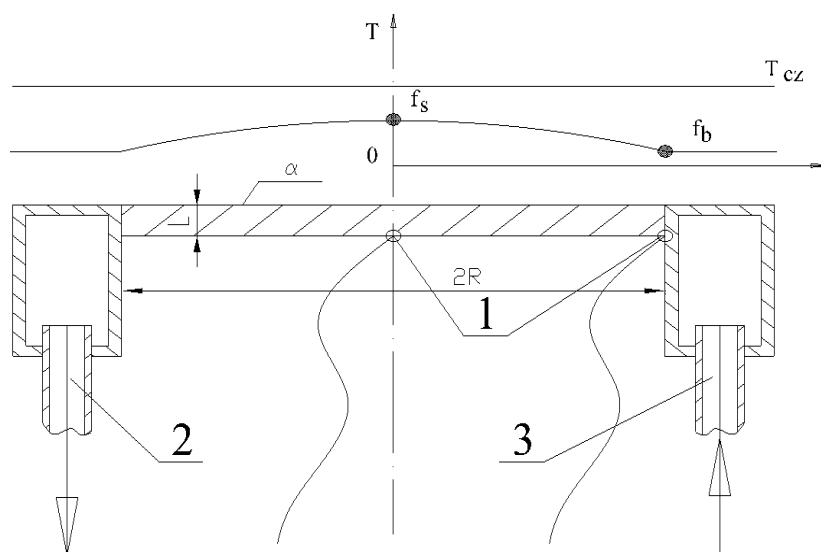
Wzór ten jest praktycznym wzorem do wyznaczania obciążenia cieplnego powierzchni ogrzewanych na drodze promieniowania. Rysunek 7.1 obrazuje wielkości użyte we wzorze (7.14),  $f_1, f_2$  to temperatury zmierzone w punktach 1 i 2.



**Rys. 7.1.** Miernik Gardona – wielkości geometryczne użyte we wzorze (7.14).

### 7.3. Pomiar współczynnika wnikania ciepła

Miernik Gardona może też służyć do wyznaczania współczynnika wnikania ciepła. Schemat takiego pomiaru przedstawiono na rys. 7.2.



**Rys. 7.2.** Schemat obrazujący pomiar współczynnika wnikania ciepła za pomocą miernika Gardona: 1 – termoelementy, 2 – wylot wody chłodzącej, 3 – wlot wody chłodzącej

Schemat na rys. 7.2 przedstawia miernik Gardona do pomiaru współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  od czynnika o temperaturze  $T_{cz}$  do powierzchni czujnika chłodzonego w odległości  $R$  od środka (na brzegu czujnika). Dla sytuacji przedstawionej na schemacie mamy  $q = \alpha(T_{cz} - T)$ . Równanie przewodzenia ciepła, przy założeniu niezmiennych od temperatury własnościach termofizycznych, tj.  $c = const, \rho = const, \lambda = const$ , ma dla stanu ustalonego, następującą postać:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{\alpha(T_{cz} - T)}{\lambda L} = 0 \quad (7.15)$$

Dla warunków brzegowych:

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=0} = 0 \quad (7.16)$$

$$T \Big|_{r=R} = f_b \quad (7.17)$$

rozwiązaniem równania (7.15) jest funkcja:

$$T = T_{cz} + (f_b - T_{cz}) \frac{I_0\left(m \frac{r}{R}\right)}{I_0(m)} \quad (7.18)$$

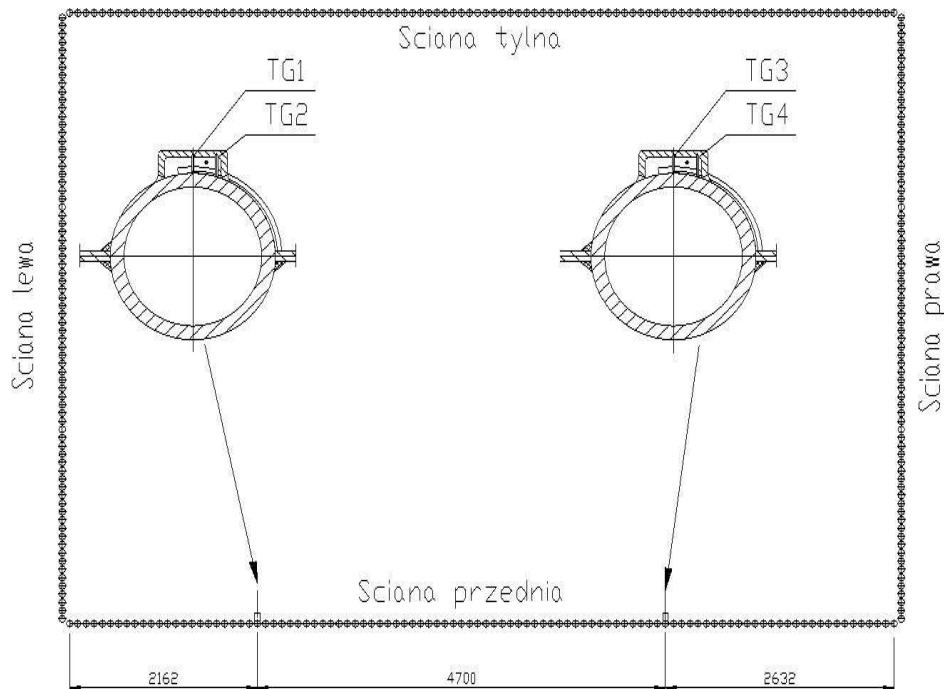
gdzie:  $m = R\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda L}}$ ,  $I_0$  – zmodyfikowana funkcja Bessela rzędu zerowego.

Na podstawie pomiaru różnicy temperatury ( $f_s - f_b$ ) można wyznaczyć współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$  na powierzchni miernika.

W niniejszym rozdziale przedstawiono praktyczne zastosowanie miernika Gardona do wyznaczania obciążenia cieplnego ściany komory paleniskowej  $q_m$ . Pomiar ten, oprócz analityczno-numerycznych metod wyznaczania lokalnego obciążenia cieplnego, jest narzędziem dodatkowym.

#### 7.4. Badania eksperymentalne

Poniżej przedstawiono oznaczenie punktów pomiarowych dla mierników Gardona zamontowanych na ścianie przedniej kotła K6 Elektrowni Skawina. Sposób pomiaru temperatury zrealizowano zgodnie z rys. 3.10.



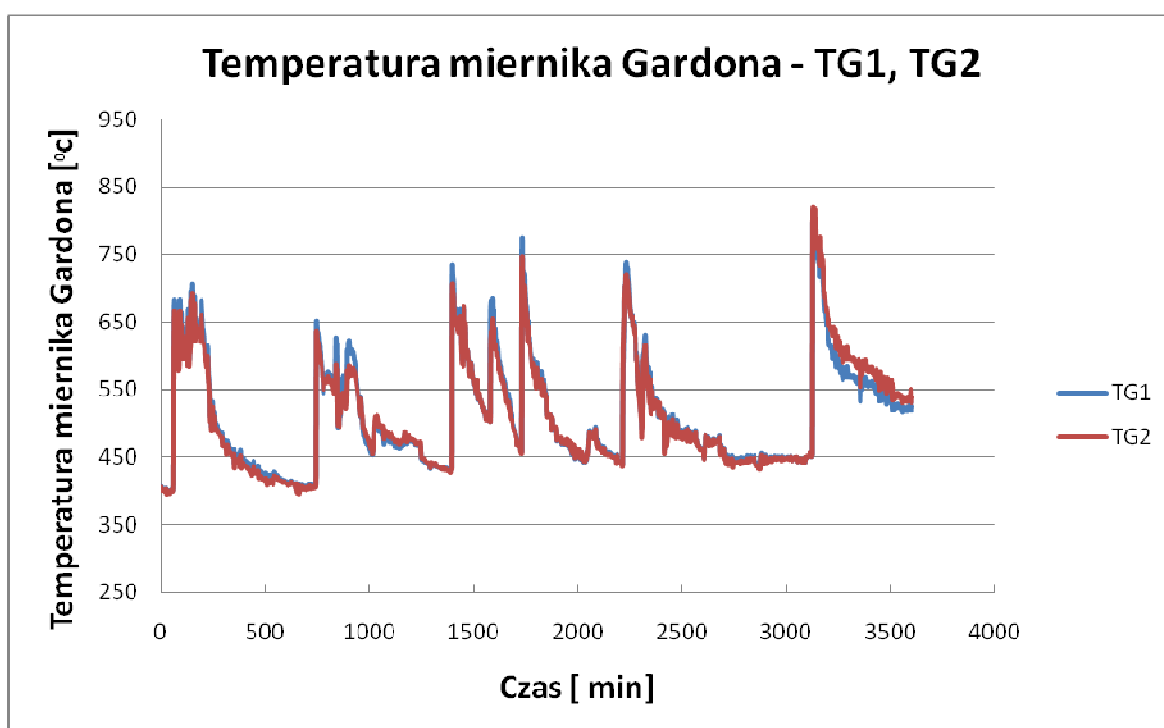
**Rys. 7.3.** Oznaczenie punktów pomiarowych ściany szczelnej ekranu kotła K6 dla mierników Gardona – poziom 12 500

Wykresy na rysunkach 7.5 i 7.6 przedstawiają wyniki pomiarów temperatury dla czujników Gardona. Do pomiarów wybrano odczyty temperatur w odstępach 1-minutowych. Współczynnik przewodzenia  $\lambda$  dla temperatur pośrednich przybliżono przy pomocy wielomianu [27]:

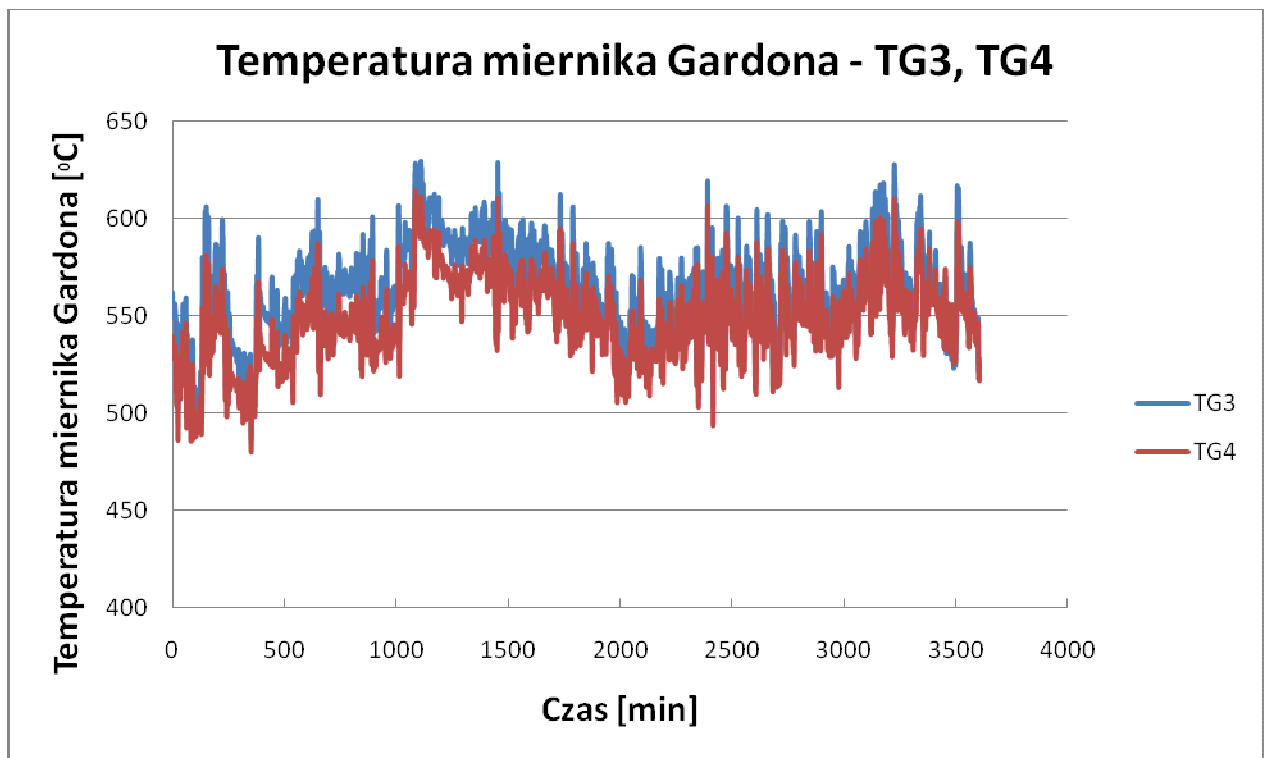
$$\lambda(T) = 49,466 - 0,0096T - 4,377 \cdot 10^{-5}T^2 + 3,148 \cdot 10^{-8}T^3$$

**Tabela 7.4.** Współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$  dla stali 16M (miernik Gardona)

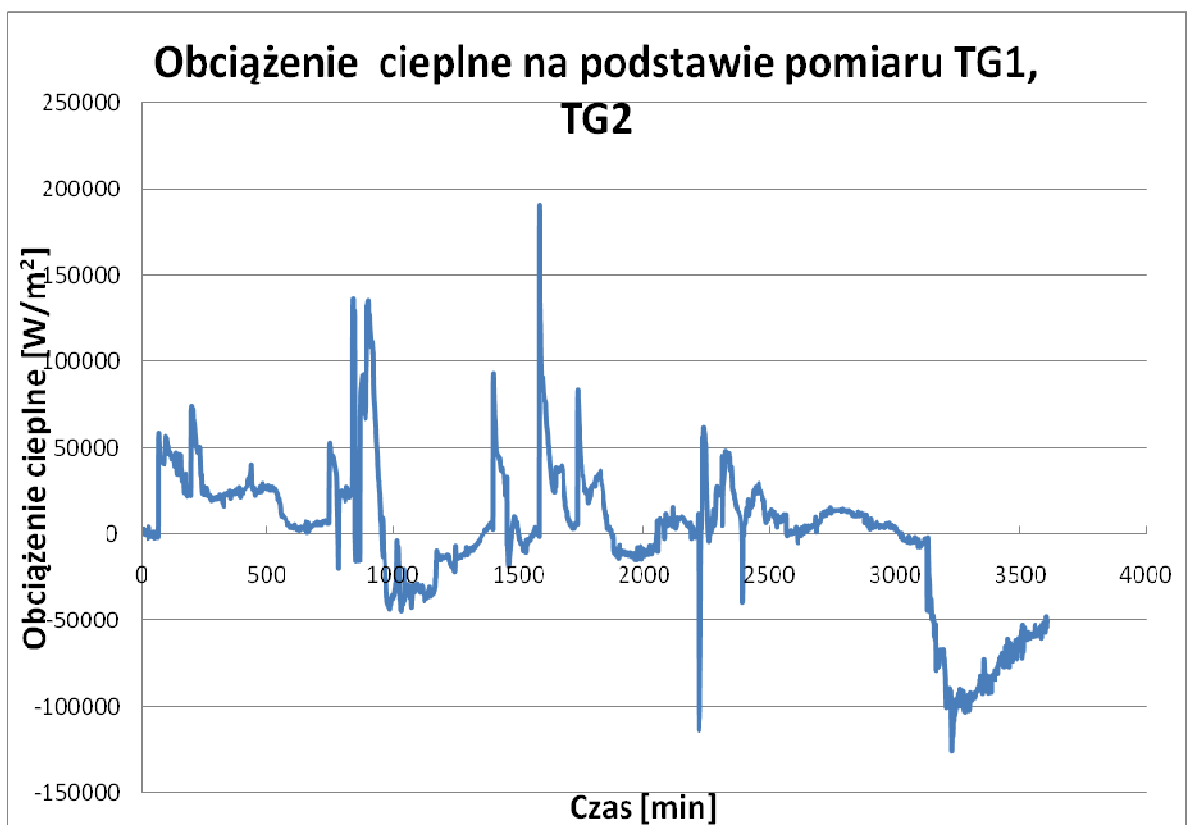
Temperatura $T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	20	100	200	300	400	500	600
Współczynnik. przewodzenia ciepła $\lambda$ [W/(mK)]	43,4	43,4	46,0	43,5	40,6	37,6	34,7



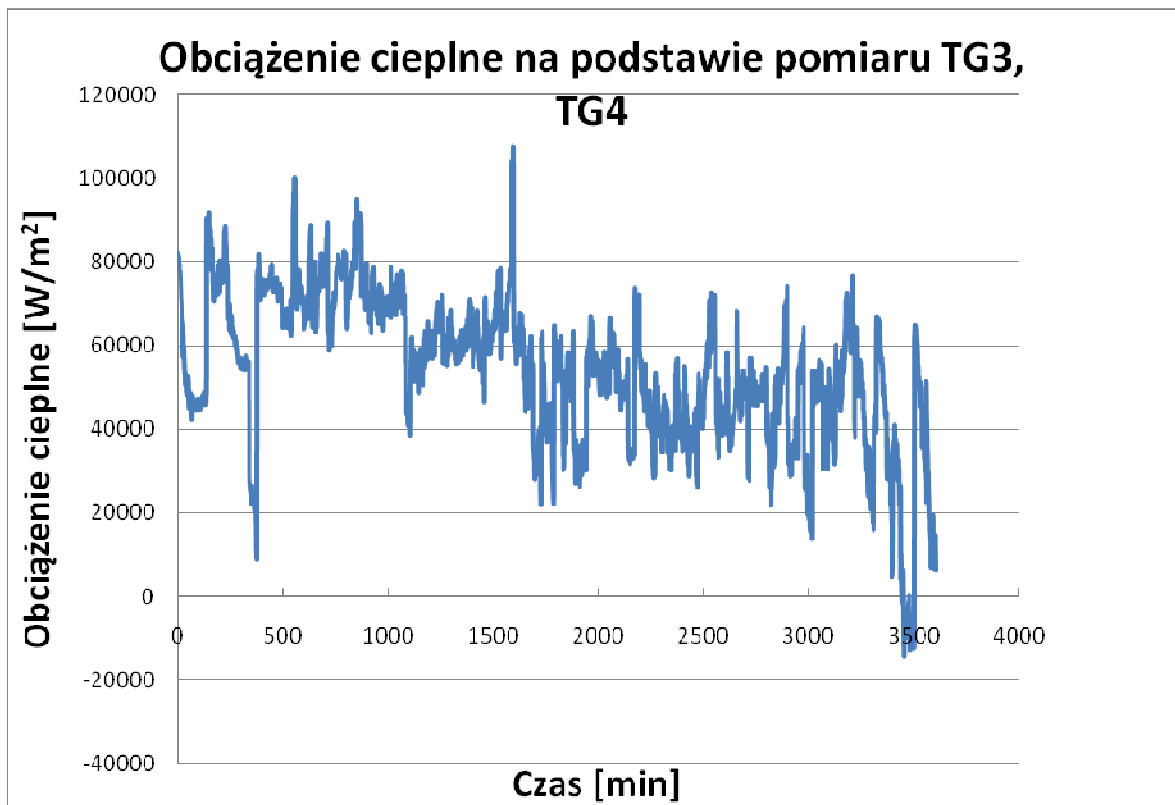
**Rys. 7.5.** Wyniki pomiarów temperatury dla mierników Gardona – pomiary TG1, TG2.



Rys. 7.6. Wyniki pomiarów temperatury dla mierników Gardona – pomiary TG3, TG4.



Rys. 7.7. Obciążenie cieplne wyznaczone  $q_m$  [W/m<sup>2</sup>] wyznaczone na podstawie pomiaru temperatury miernikiem Gardona – pomiary w punktach TG1, TG2.

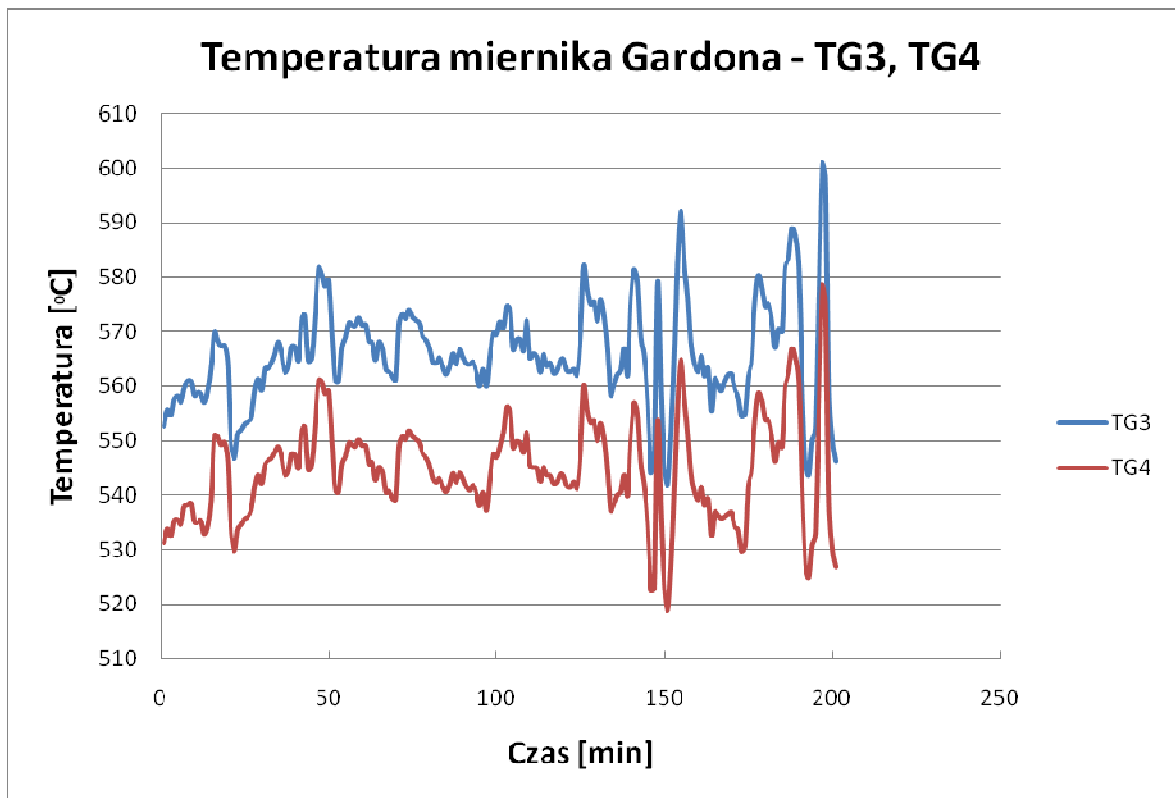


**Rys. 7.8.** Obciążenie cieplne  $q_m$  [ $W/m^2$ ] wyznaczone na podstawie pomiaru temperatury miernikiem Gardona – pomiary w punktach TG3, TG4.

Zauważmy, że obciążenie zmienia się w sposób cykliczny, co sugeruje odkładanie się zanieczyszczeń na ścianie szczelnej i po jakimś czasie ich odpadanie. Obciążenie cieplne na wykresie mniejsze od zera jest spowodowane większą temperaturą brzegu czynnika niż jego środka (wzór 7.14), co również jest spowodowane obecnością zanieczyszczeń na samym mierniku Gardona. Zauważalna jest nierównomierność obciążenia prawej i lewej strony ściany przedniej na wysokości 12 500 mm.

Wykresy na rysunkach 7.5-7.8 sugerują dynamicznie zmienny przebieg pomiarów i obliczeń. Aby wyniki poddać skutecznej analizie, zakres badań zawężono do 200 minut. Wykresy na rysunkach 7.9 i 7.10 obrazują wyniki pomiarów temperatury i obliczenia obciążenia dla prawej strony ściany przedniej przy użyciu miernika Gardona. Wykres na rys. 7.11 przedstawia wydajność kotła dla okresu przeprowadzania pomiarów. Na jego podstawie można przyjąć, że wydajność ta utrzymywała się na stałym poziomie 67-72%.

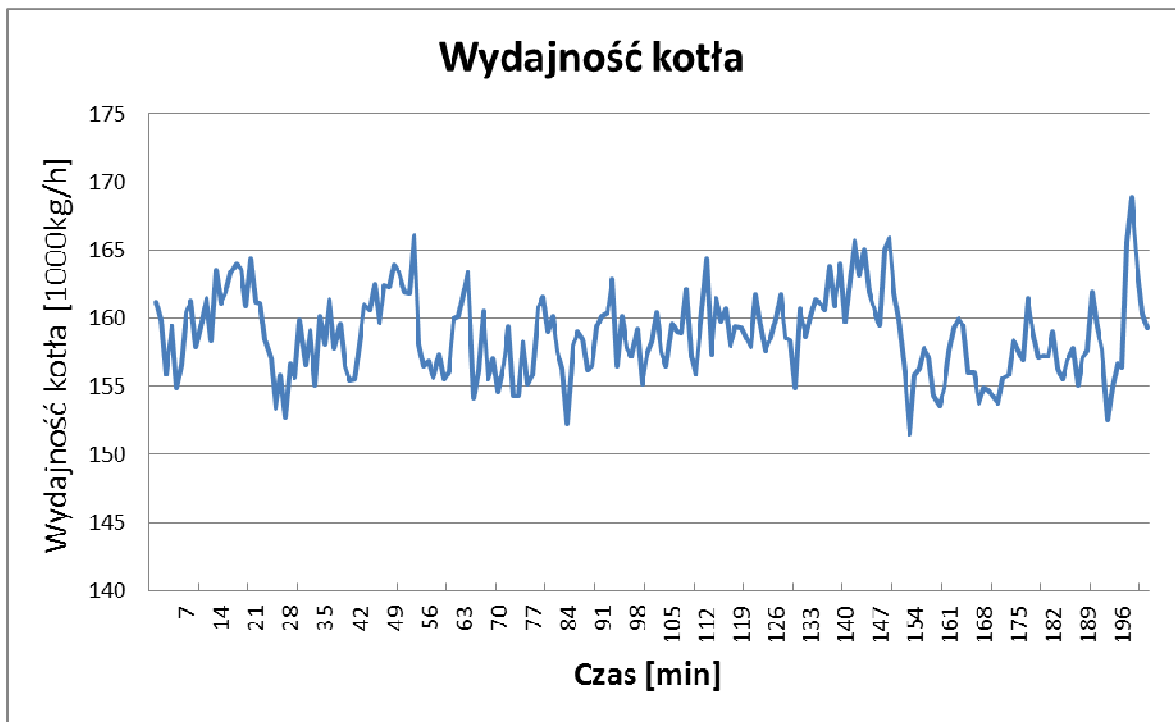




**Rys. 7.9.** Wyniki pomiarów temperatury dla mierników Gardona – pomiary TG3, TG4 – okres pomiaru 200 minut.



**Rys. 7.10.** Obciążenie cieplne wyznaczone  $q_m$  [W/m<sup>2</sup>] wyznaczone na podstawie pomiaru temperatury miernikiem Gardona – pomiary w punktach TG3, TG4 – okres pomiaru 200 minut.



**Rys. 7.11.** Wydajność kotła  $D$  [ $10^3$ kg/h] dla okresu pomiarowego.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że obciążenie cieplne  $q_m$  jest niskie, gdyż wraz z węglem współspalana jest biomasa. Można również zauważyć, że na mierniku Gardona odkłada się żużel. Może to powodować duże błędy wyznaczania obciążenia cieplnego  $q_m$  ponieważ warstwa żużla na mierniku może być inna niż na powierzchni ekranu.

## 8. WYZNACZANIE LOKALNEGO OBCIĄŻENIA CIEPLNEGO ŚCIANY KOMORY PALENISKOWEJ NA PODSTAWIE POMIARU TEMPERATURY RURY EKRAKOWEJ I PŁETWY

### 8.1. Metoda numeryczna bazująca na metodzie elementów skończonych

W rozdziale przedstawiono sposób wyznaczania obciążenia cieplnego na podstawie pomiaru temperatury w trzech punktach: wierzchołku rury od strony płomienia, środka płetwy od strony płomienia oraz wierzchołku rury od strony izolacji. Dane do obliczeń (wymiary geometryczne, właściwości fizykochemiczne materiału ściany szczelnej) zostały wzięte z rozdziału 4 dla elementu ściany szczelnej kotła K6 w Elektrowni Skawina. Zadanie wyznaczania nieznanymi parametrów:  $q_m$  i  $\alpha$  zostało sformułowane jako poszukiwanie minimum funkcji celu, zdefiniowanej następująco:

$$S_t = (f_1 - T_{1MES})^2 + (f_2 - T_{2MES})^2 + (f_3 - T_{3MES})^2 \quad (8.1)$$

gdzie:

$f_1, f_2, f_3$  – temperatury z pomiaru w punktach 1, 2 i 3,

$T_{1MES}, T_{2MES}, T_{3MES}$  – temperatury z obliczeń numerycznych,

Nieznane parametry to obciążenie cieplne ściany komory paleniskowej  $q_m$  i współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$ :

Przyjęto następujące ograniczenia:

$$10000 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \leq q_m \leq 300000 \left[ \frac{W}{m^2} \right],$$

$$500 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \leq \alpha \leq 50000 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right].$$

## 8.2. Testy obliczeniowe

W pierwszej części przedstawiono dwa przykłady, aby przetestować poprawność działania programu optymalizacji tj. programu do wyznaczania  $q_m$  i  $\alpha$ , przy których suma kwadratów zmierzonych i obliczonych różnic temperatury (8.1) jest minimalna

### Przykład 1:

Do obliczeń przyjęto następujące temperatury pomiarowe w punktach 1, 2 i 3.

$$T_1 = 458.63 \quad [^{\circ}\text{C}],$$

$$T_2 = 393.20 \quad [^{\circ}\text{C}],$$

$$T_3 = 319.71 \quad [^{\circ}\text{C}].$$

Minimalizując sumę (8.1) otrzymano :

$$q = 200009,5 \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right],$$

$$\alpha = 2000,31 \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right].$$

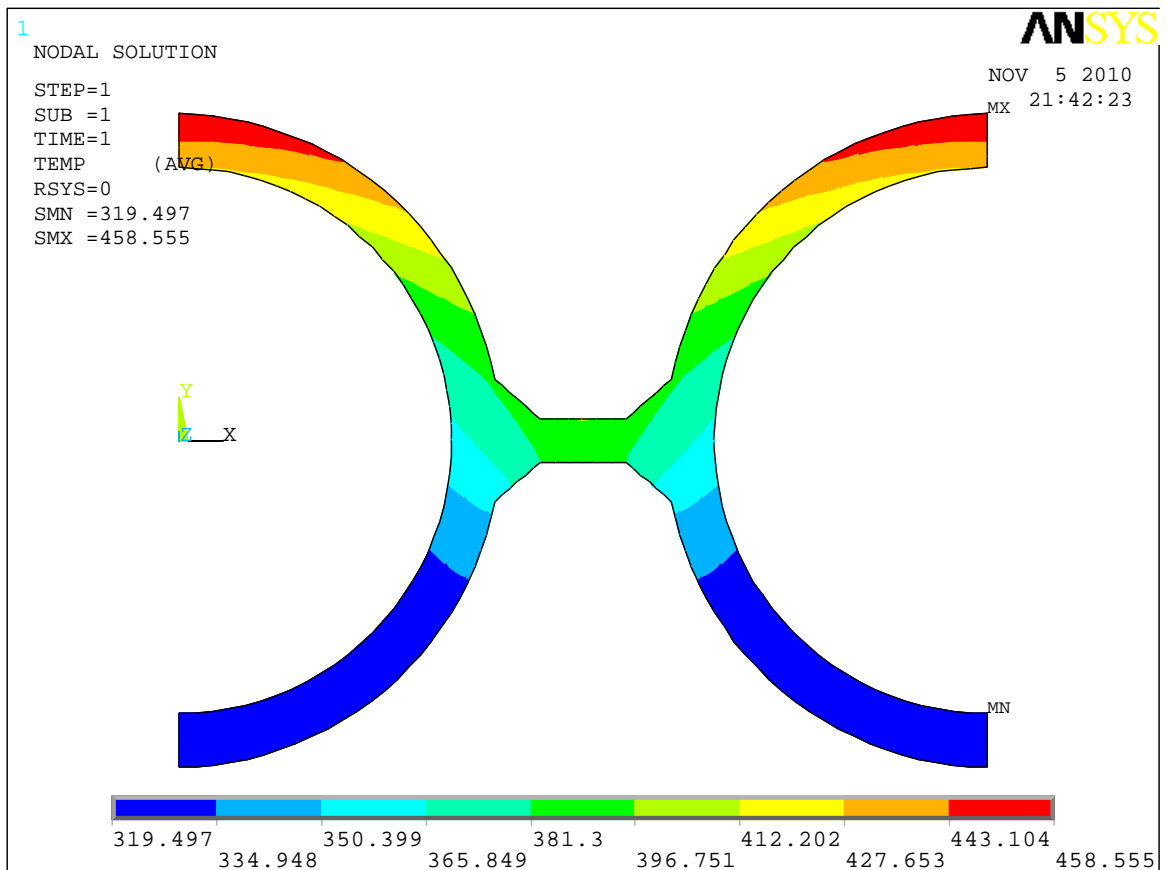
Przy oszacowanych wartościach  $q_m$  i  $\alpha$  uzyskano następujące wartości temperatur:

$$T_{1MES} = 458.64 \quad [^{\circ}\text{C}],$$

$$T_{2MES} = 393.30 \quad [^{\circ}\text{C}],$$

$$T_{3MES} = 319.71 \quad [^{\circ}\text{C}].$$

Wartość funkcji celu wynosi:  $S_t = 0,9267 \cdot 10^{-4} [K^2]$



**Rys. 8.1.** Rozkład temperatury na przekroju ściany szczelnej (przykład 1)

**Przykład 2:**

Do obliczeń przyjęto następujące temperatury pomiarowe w punktach 1, 2 i 3 (rys. 8.2):

$$f_1 = 374.04 \text{ } [^{\circ}\text{C}],$$

$$f_2 = 350.12 \text{ } [^{\circ}\text{C}],$$

$$f_3 = 318.46 \text{ } [^{\circ}\text{C}].$$

Z minimalizacji funkcji (8.1) otrzymano :

$$q = 105621,3 \text{ } \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right],$$

$$\alpha = 2968,03 \text{ } \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right].$$

Przy oszacowanych wartościach  $q_m$  i  $\alpha$  uzyskano następujące wartości temperatur:

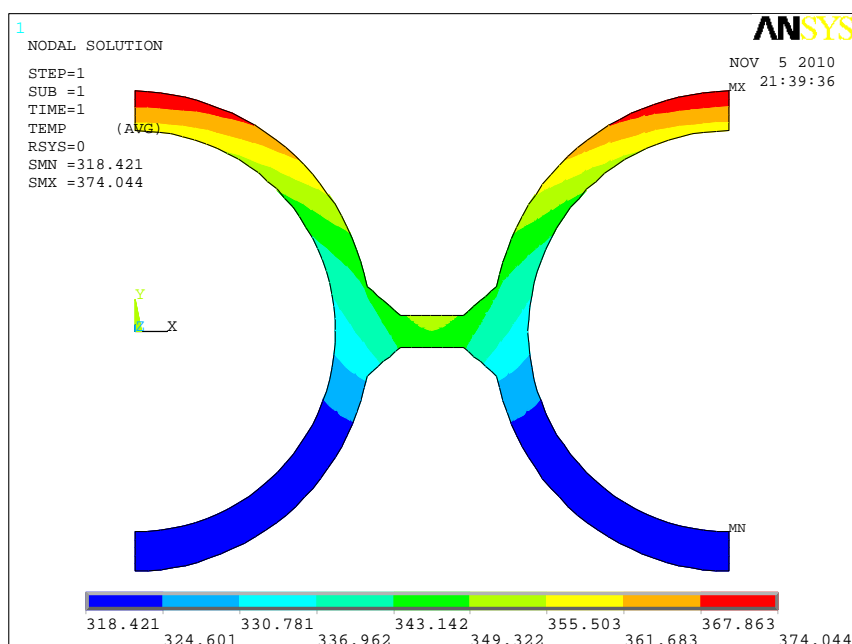
$$T_{1MES} = 374,04 \text{ } [^{\circ}\text{C}],$$

$$T_{2MES} = 350,12 \text{ } [^{\circ}\text{C}],$$

$$T_{3MES} = 318,47 \text{ } [^{\circ}\text{C}],$$

dla których wartość funkcji celu wynosi:

$$S_T = 0,9726 \cdot 10^{-5} [K^2]$$



Rys. 8.2. Rozkład temperatury na przekroju ściany szczelnej (przykład 2)

Jak widać z poniższych przykładów, dokładność obliczeń iteracyjnych jest zadowalająca. W zadaniu optymalizacji zostały wykorzystane następujące podprogramy z programu ANSYS :

**SWEEP** — Perform global sweeps through global design space starting from a single design set

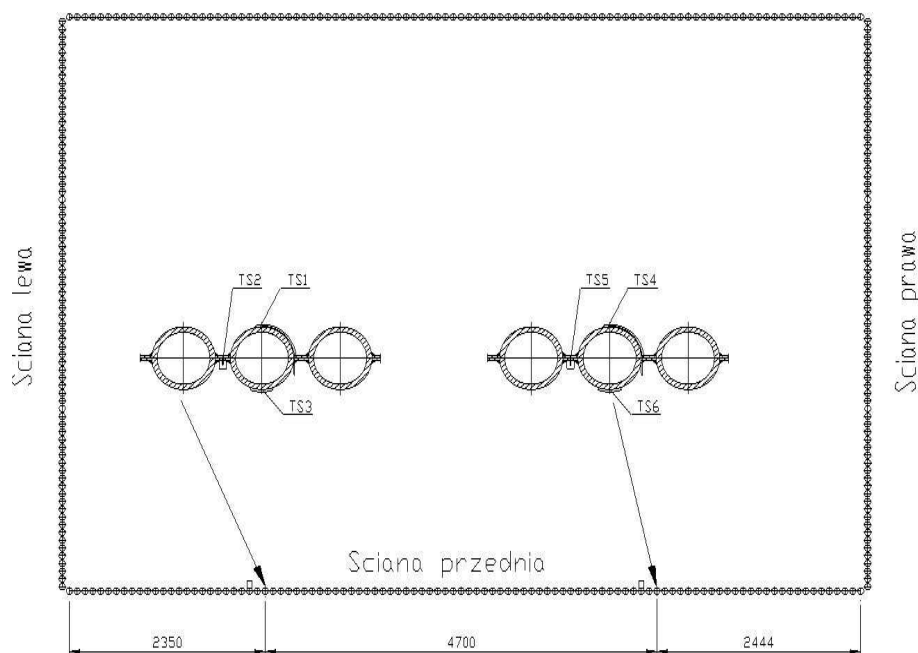
**SUBP** — Subproblem approximation method

Wyniki przeprowadzonych testów są zadowalające z uwagi na przyjęte małe różnice wartości  $\alpha$  wynoszące odpowiednio 2000 i 3000  $[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$ . Jak już wspomniano w rozdziale 4, dokładność

wyznaczania współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  na podstawie pomiaru temperatury w punktach P1, P2 i P3 będzie niska gdy  $\alpha \geq 10000 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

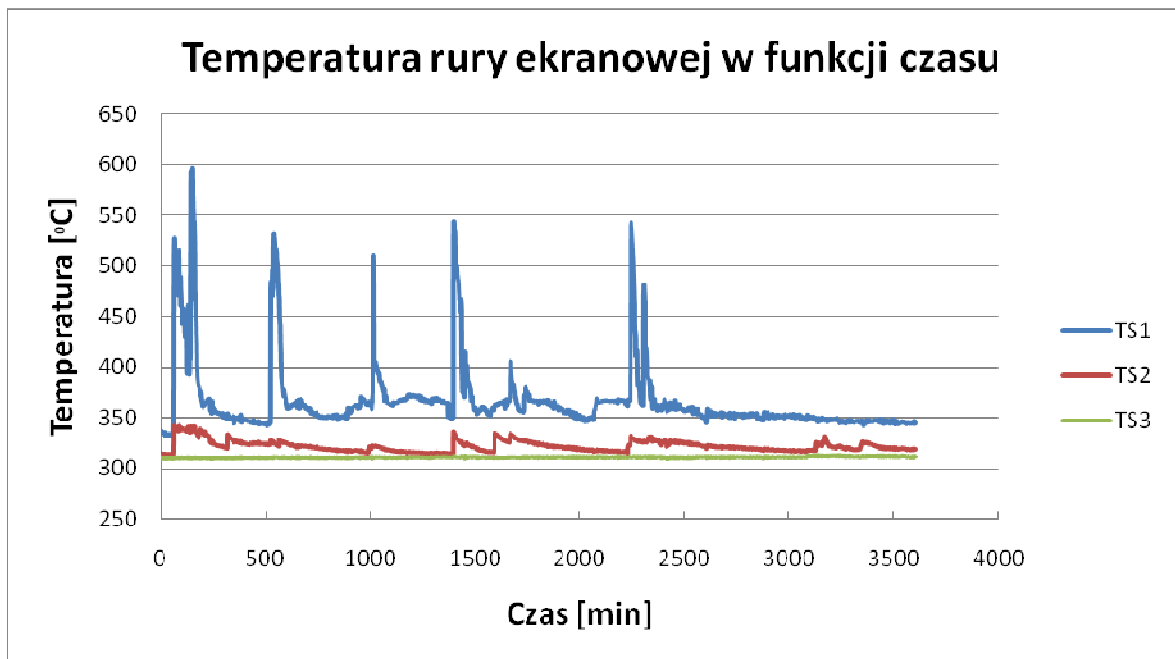
### 8.3. Badania eksperymentalne

W tej części pracy do obliczeń obciążenia cieplnego ściany i współczynnika wnikania przyjęto dane z pomiarów temperatury na kotle K6 Elektrowni Skawina. Poniżej przedstawiono oznaczenie punktów pomiarowych temperatury w ścianie przedniej komory paleniskowej. Sposób pomiaru temperatury zrealizowano zgodnie z rys. 3.9. Mierzone były temperatury rury na powierzchni zewnętrznej zarówno od strony paleniska jak i obmurza, jak również temperatura środka płaskownika.

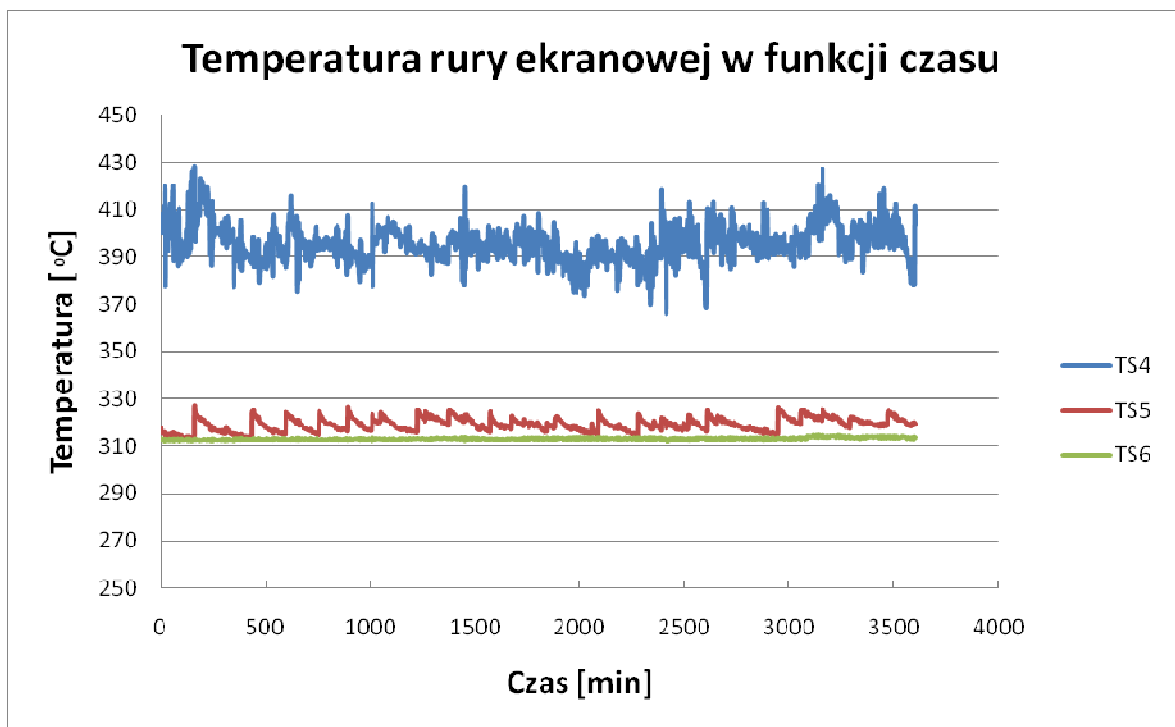


**Rys. 8.3.** Oznaczenie punktów pomiarowych ściany szczelnej ekranu kotła K6 – poziom 12 500.

Na wykresach 8.4 i 8.5 zestawiono wyniki pomiarów temperatury. Sposób pomiaru pozwala na odczyt temperatur w trybie on-line. Do pomiarów jednak, ze względu na powolny przebieg zmian temperatur ekranu, wybrano odczyty temperatur w odstępach minutowych.

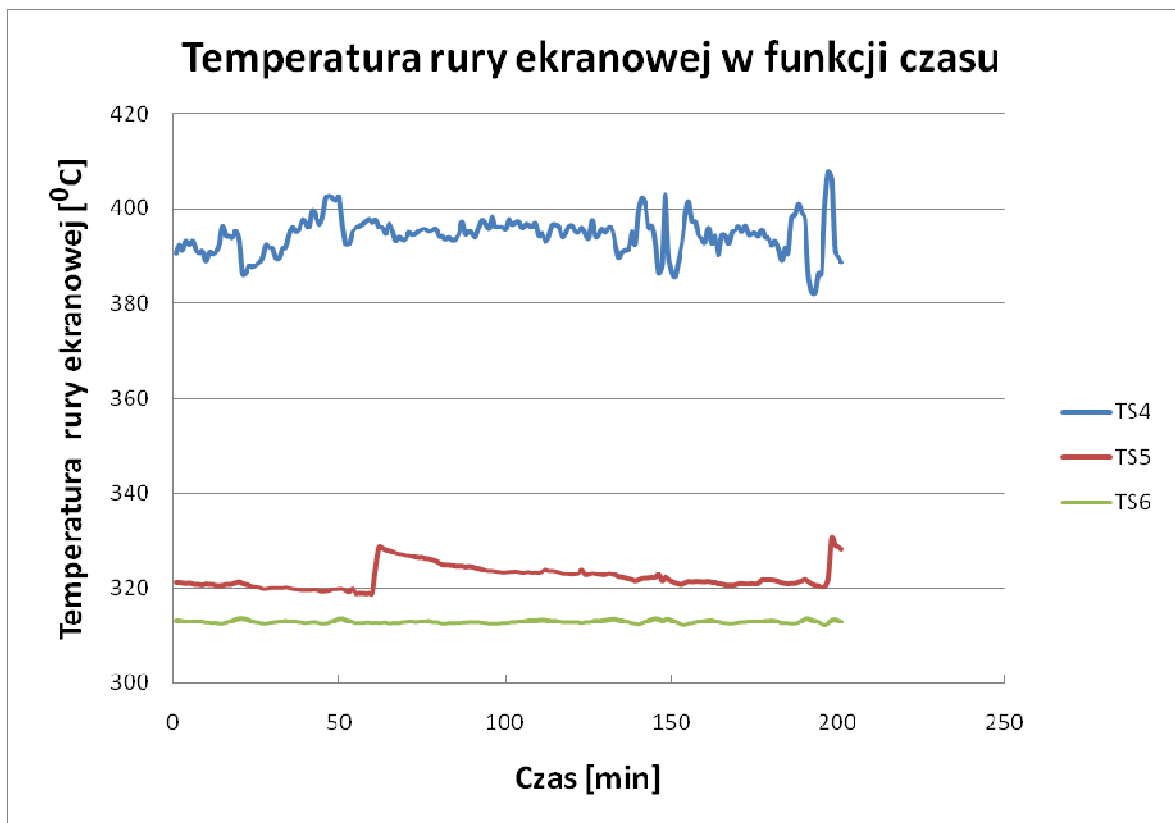


Rys. 8.4. Wyniki pomiarów temperatury w trzech punktach rury ekranowej (punkty: TS1, TS2, TS3).

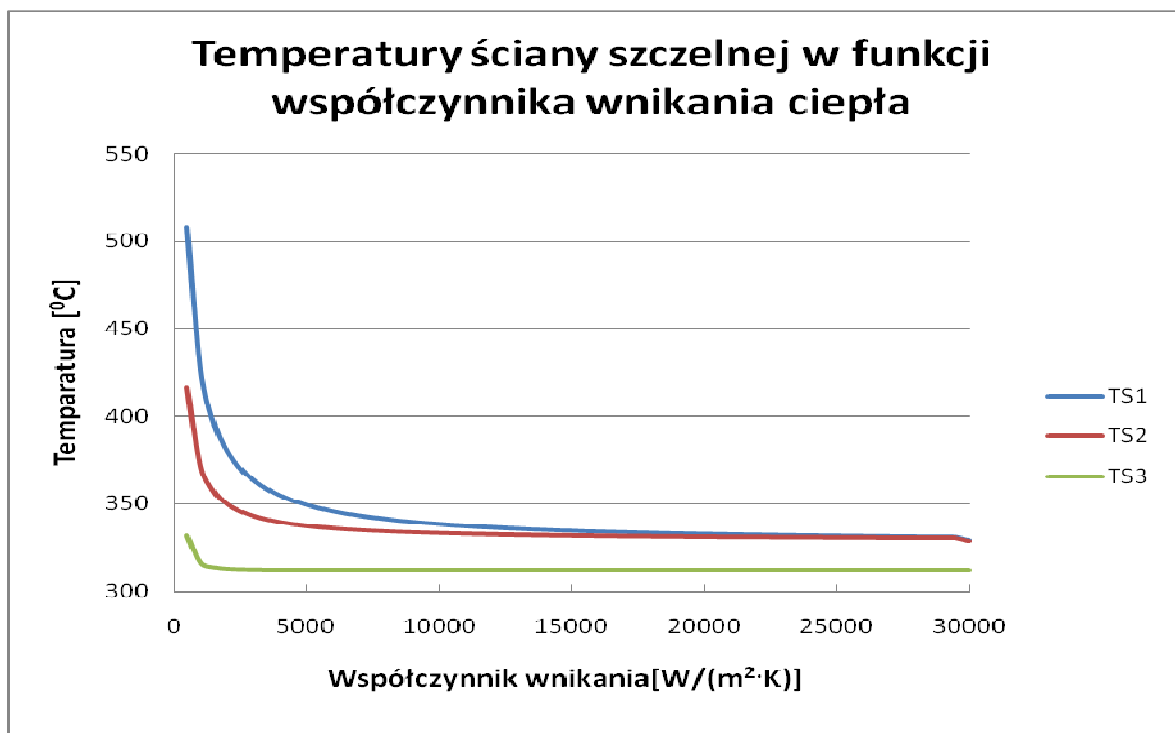


Rys. 8.5. Wyniki pomiarów temperatury w trzech punktach rury ekranowej (punkty: TS4, TS5, TS6).





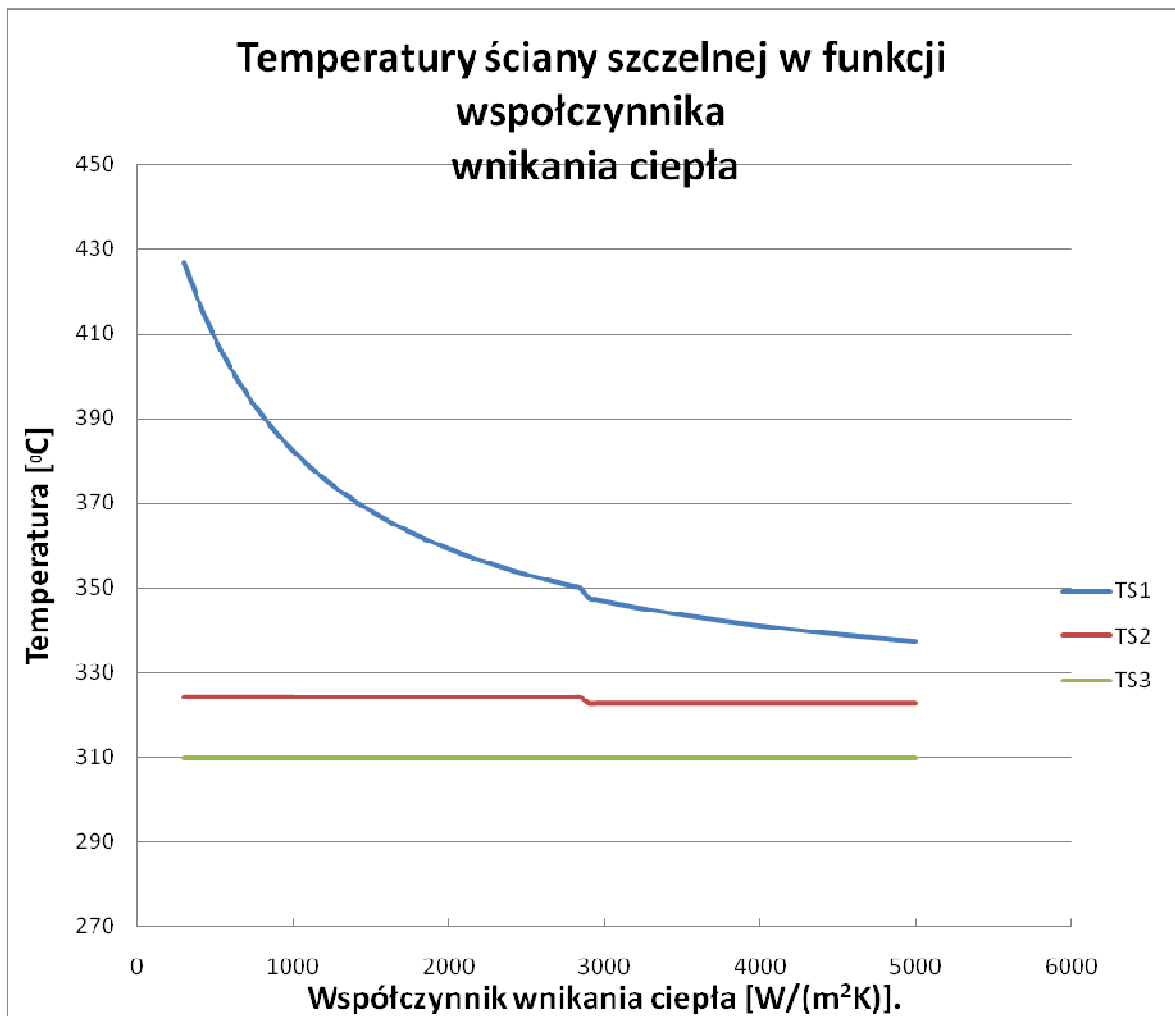
**Rys. 8.6.** Wyniki pomiarów temperatury w trzech punktach rury ekranowej (punkty: TS4, TS5, TS6) – okres pomiaru 200 minut.



**Rys. 8.7.** Obliczenia temperatury w trzech punktach rury ekranowej (punkty: TS1, TS2, TS3) dla założonego obciążenia cieplnego  $q_m = 97\ 600\ [\text{W}/\text{m}^2]$  i temperatury czynnika wynoszącej  $309\ [^\circ\text{C}]$ .

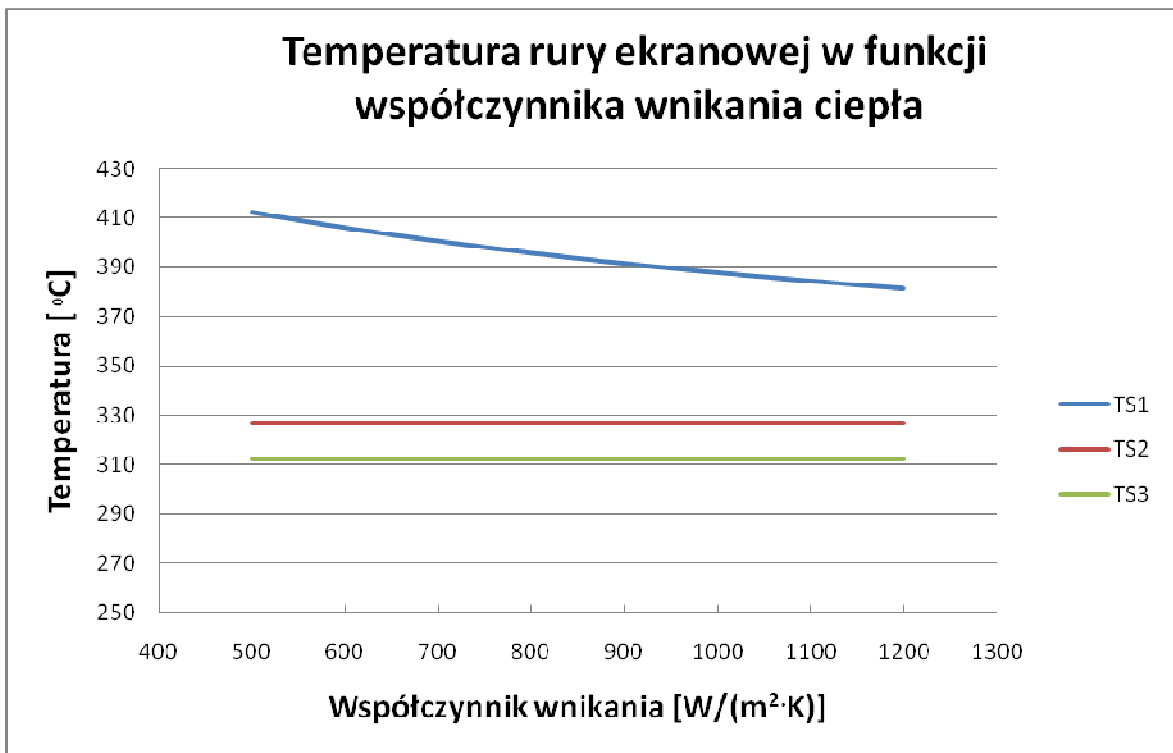
Z uwagi na znaczną różnicę pomiędzy temperaturą wierzchołka rury a temperaturą czynnika przeprowadzono obliczenia temperatury dla rury ekranowej przy różnych współczynnikach wnikania ciepła dla założonego obciążenia cieplnego. Wyniki, które przedstawiono w formie wykresu na rys. 8.7, sugerują niewielki odbiór ciepła w miejscu pomiaru, co z kolei prowadzi do niebezpiecznych przekroczeń temperatury dla materiału kotłowego rury ekranowej.

Poniżej na rysunku 8.8 przedstawiono wykres zależności temperatury w trzech punktach rury ekranowej w funkcji współczynnika wnikania ciepła przy założonym obciążeniu cieplnym wynoszącym  $79\,200 \text{ [W/(m}^2\text{)]}$ . Do obliczeń przyjęto nierównomierny rozkład współczynnika wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni rury. W czołowej części rury od strony paleniska, w zakresie kąta  $-45^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$ , przyjęto mniejszy współczynnik wnikania ciepła. Na pozostałej powierzchni wewnętrznej przyjęto stały współczynnik wnikania ciepła równy  $30\,000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ . Konieczność przyjęcia różnego współczynnika wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni rury wynika z niskiej temperatury środka płaskownika i wysokiej temperatury czoła rury. (rys. 8.4-8.6). Z analizy wyników przedstawionych na rysunkach 8.4-8.6 widać, że współczynnik wnikania ciepła na wewnętrznej rury naprzeciw płaskownika musi być wysoki, gdyż mierzona temperatura środka płaskownika jest niska. W rurach ekranowych o dużej średnicy ( $d_z=76,1 \text{ mm}$ ,  $d_w=63,4\text{mm}$ ) zastosowanych w badanym parowniku może następować rozwarstwienie mieszaniny parowo-wodnej. Przez część przekroju rury od strony paleniska może przepływać para wodna, co prowadzi do spadku wartości współczynnika wnikania ciepła. W pozostałej, mniej obciążonej cieplnie części rury może przepływać mieszanina pary i wody. W tym obszarze współczynnik wnikania ciepła na powierzchni wewnętrznej jest wysoki. Na rysunku 8.8 przedstawiono wpływ zmian współczynnika wnikania ciepła w czołowej części rury ( $-45^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$ ) na maksymalną temperaturę rury (punkt TS1). Widać, że przy małych wartościach  $\alpha$  w tym obszarze maksymalna temperatura ścianki rury szybko rośnie wraz ze zmniejszającym się współczynnikiem wnikania ciepła w czołowej części rury. Temperatura w środku płaskownika zmienia się tylko nieznacznie. Wynika to z dużej wartości współczynnika wnikania ciepła ( $\alpha=30\,000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ) na pozostałej części rury. Z analiz przeprowadzonych w paragrafach 4.2 i 8.2 wynika, że sposób wyznaczania obciążenia cieplnego bazujący na pomiarach temperatury ekranu w punktach P1, P2 i P3 (rys. 4.10) jest mniej dokładny niż pomiar za pomocą mimośrodowej wstawki termometrycznej (rys. 5.1).

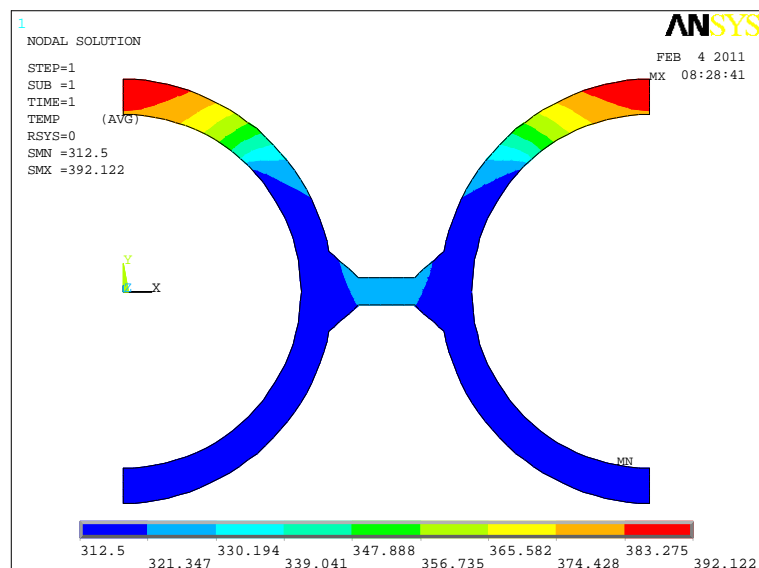


**Rys. 8.8.** Obliczenia temperatury w trzech punktach rury ekranowej (punkty: TS1, TS2, TS3) dla założonego obciążenia cieplnego  $q = 79\,200$  [W/m<sup>2</sup>] i temperatury czynnika wynoszącej 309,7 [°C]. Współczynnik wnikania ciepła w czołowej części rury (-45°, 45°) zmienia się w przedziale : 100-5000 [W/(m<sup>2</sup>K)]. Na pozostałej powierzchni wewnętrznej przyjęto stały współczynnik wnikania ciepła równy 30 000 W/(m<sup>2</sup>K)

Podobne obliczenia wykonano dla konkretnych obciążeń cieplnych, które zostały wyznaczone na podstawie pomiarów miernikiem Gardona zainstalowanym na prawej stronie ściany szczelnej. Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresach poniżej.

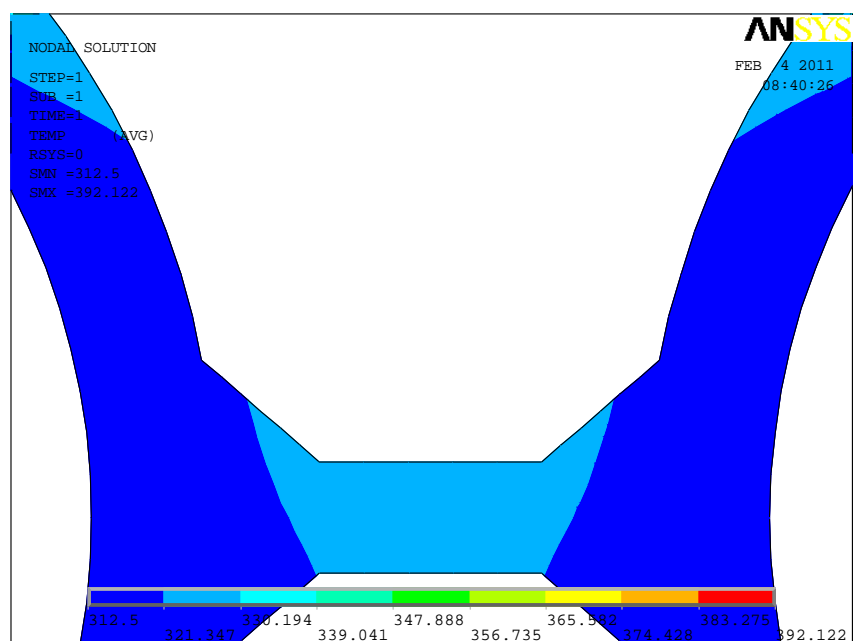


**Rys. 8.9.** Obliczenia temperatury w trzech punktach rury ekranowej (punkty: TS1, TS2, TS3) dla założonego obciążenia cieplnego  $q = 89\,459 \text{ [W/m}^2\text{]}$  i temperatury czynnika wynoszącej  $T_{cz} = 312,5 \text{ [°C]}$ . Współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$  w przedziale  $-45^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$  zmienia się od 500-1200  $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ .

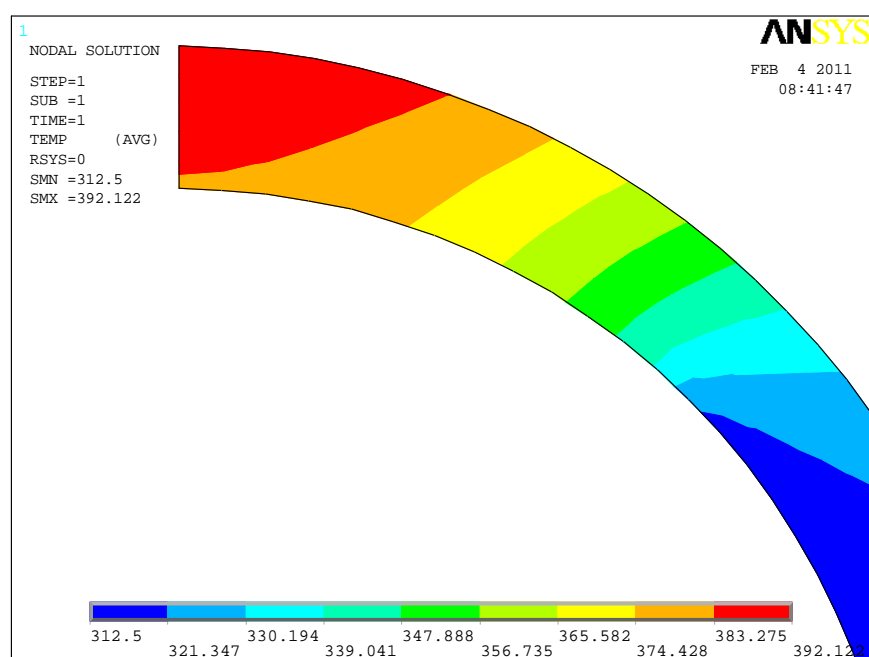


**Rys. 8.10.** Rozkład temperatury w przekroju ściany ekranowej dla założonego obciążenia cieplnego  $q_m = 89\,459 \text{ [W/m}^2\text{]}$  i temperatury czynnika wynoszącej  $T_{cz} = 312,5 \text{ [°C]}$ .

Współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$  dla  $-45^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$  wynosi 900  $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ .



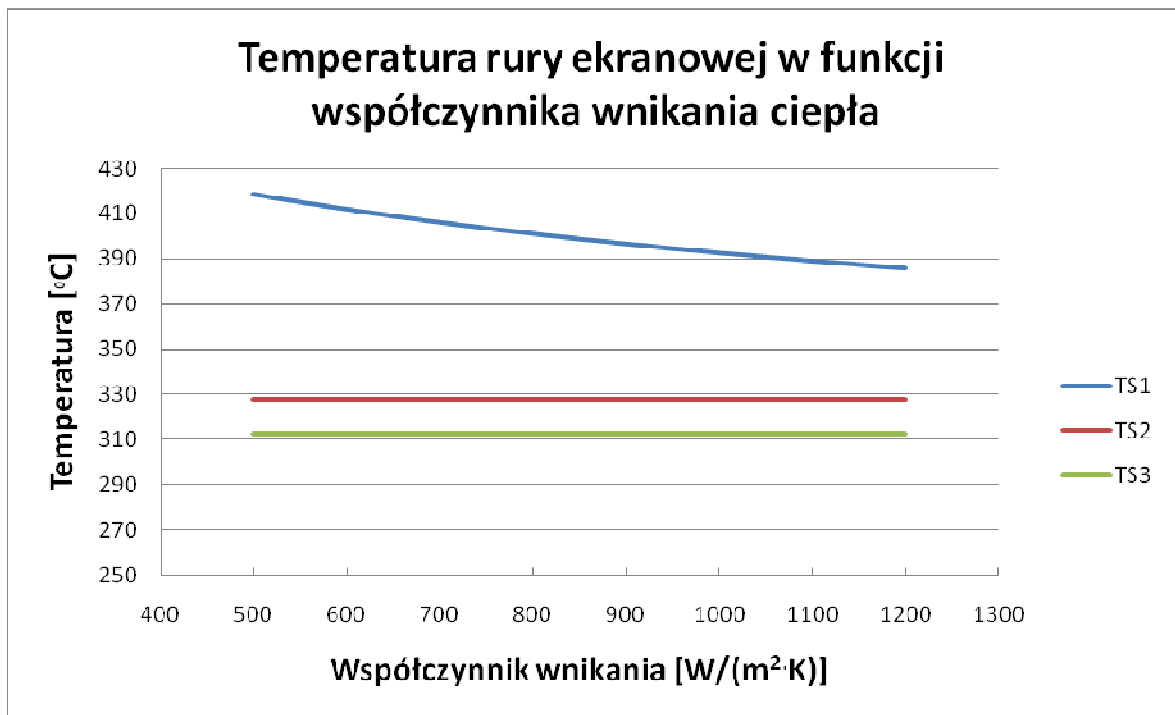
**Rys. 8.11.** Rozkład temperatury w przekroju płetwy dla założonego obciążenia cieplnego  $q_m = 89\,459 \text{ [W/m}^2\text{]}$  i temperatury czynnika wynoszącej  $T_{cz} = 312,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$ . Współczynnik wnikania ciepła w czołowej części rury  $\alpha = 900 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$ , a na pozostałej części obwodu  $\alpha = 30\,000 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$ ,



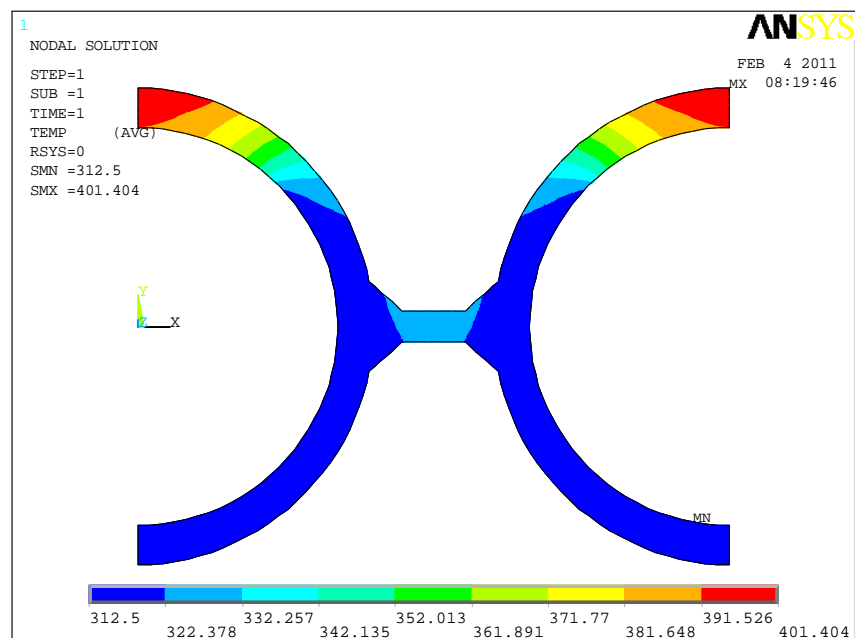
**Rys. 8.12.** Rozkład temperatury w obszarze wierzchołka rury dla założonego obciążenia cieplnego  $q_m = 89\,459 \text{ [W/m}^2\text{]}$  i temperatury czynnika wynoszącej  $T_{cz} = 312,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$ . Współczynnik wnikania ciepła w czołowej części rury  $\alpha = 900 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$ , a na pozostałej części obwodu  $\alpha = 30\,000 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$ ,

**Tablica 8.1.** Wybrane wyniki pomiarów temperatury – kolorem żółtym zaznaczono wyniki wykorzystane do obliczeń (rys. 8.10-8.12)

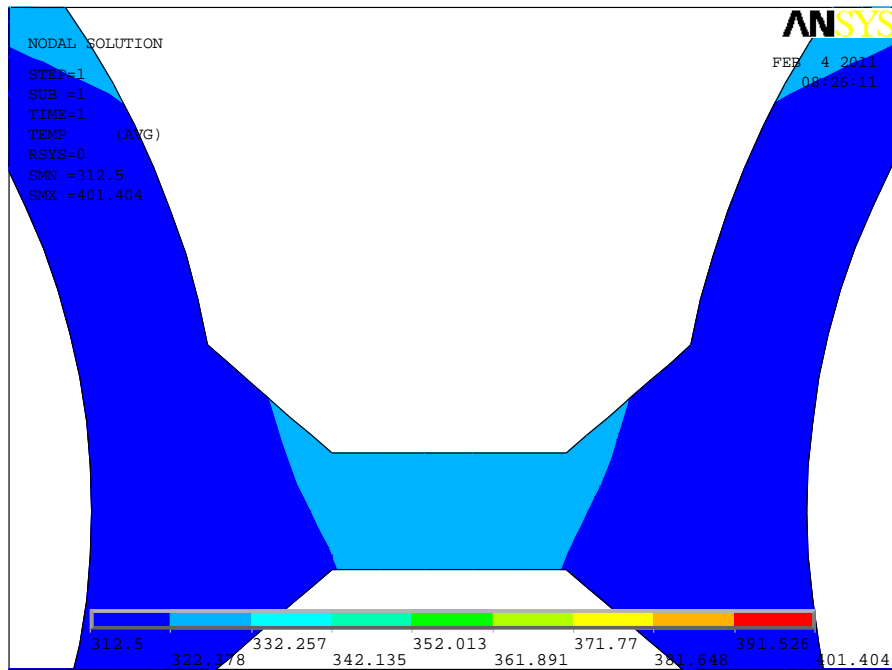
Godz.	Czas [min]	TG3 [°C]	TG4 [°C]	Obc. Ciepłne $q_m$ [W/m <sup>2</sup> K]	TS1	TS2	TS3
<b>02:50:00 (2011-01-18)</b>	1	552,7	531,2	77550,27	390,6	326,2	313,1
02:51:00	2	555,7	533,8	78814,57	392,5	326,2	313,1
02:52:00	3	554,7	532,5	79968,59	391,2	326,1	313
02:53:00	4	557,7	535,4	80137,44	393,2	326	312,9
02:54:00	5	558,3	535,5	81911,14	392,3	326,1	312,9
02:55:00	6	557,0	534,6	80545,66	393,2	326,9	312,9
02:56:00	7	559,5	537,8	77848,76	391,2	326,8	312,9
02:57:00	8	561,0	538,2	81732,35	390,7	326,8	312,9
02:58:00	9	561,0	538,6	80285,37	391	326,7	312,9
02:59:00	10	558,4	535,1	83717,70	389,1	326,9	312,7
03:00:00	11	558,9	535,0	85859,76	390,8	326,8	312,7
03:01:00	12	558,7	535,4	83697,39	390,5	326,8	312,6
03:02:00	13	557,0	532,9	86718,46	390,8	326,6	312,7
<b>03:03:00</b>	<b>14</b>	<b>559,3</b>	<b>534,4</b>	<b>89459,70</b>	<b>392,1</b>	<b>326,5</b>	<b>312,5</b>
03:04:00	15	563,6	539,4	86617,96	396,3	326,6	312,5
03:05:00	16	570,0	551,1	67152,41	394,3	326,8	312,7
03:06:00	17	568,5	550,8	62934,54	394,2	326,8	312,9
03:07:00	18	567,3	549,3	64071,42	393,9	326,9	313,1
03:08:00	19	567,5	549,7	63344,06	395,2	327,1	313,3
03:09:00	20	564,3	546,4	63868,08	393,5	327,3	313,5
03:10:00	21	549,3	533,0	58831,35	386,3	327	313,5
03:11:00	22	546,8	529,8	61499,28	386,6	326,8	313,4
03:12:00	23	551,3	533,7	63454,31	388,1	326,6	313,2
03:13:00	24	552,1	534,6	63050,43	387,7	326,3	312,9
03:14:00	25	553,1	535,7	62636,94	388,1	326,2	312,8
03:15:00	26	553,5	536,1	62616,68	388,7	326,1	312,7
03:16:00	27	554,2	537,4	60408,54	389,9	326,8	312,5
03:17:00	28	559,0	541,4	63060,25	392,5	326,8	312,5
03:18:00	29	561,4	543,7	63297,94	391,9	326,9	312,6
03:19:00	30	559,3	542,2	61241,42	391,6	327	312,7
03:20:00	31	563,3	545,5	63560,20	389,7	327	312,8
03:21:00	32	563,2	546,4	59969,83	389,7	327	312,9
03:22:00	33	564,3	546,8	62430,68	391,6	327	312,9
03:23:00	34	565,9	547,9	64144,22	391,7	327,1	313
03:24:00	35	568,1	548,9	68331,94	394,3	327	312,9
03:25:00	36	565,9	546,9	67735,40	396,1	326,8	312,9
03:26:00	37	562,6	543,7	67556,65	395,1	326,7	312,9
03:27:00	38	563,5	544,3	68587,32	395,7	326,6	312,8
03:28:00	39	567,3	547,6	70171,25	397,6	326,5	312,7
03:29:00	40	567,2	547,3	70895,19	397,1	326,5	312,6
03:30:00	41	564,8	545,0	70673,46	396,1	326,5	312,7
03:31:00	42	572,5	552,0	72737,12	399,6	326,6	312,8
03:32:00	43	573,0	552,6	72349,97	398,4	326,6	312,8
03:33:00	44	564,7	544,7	71398,94	396,7	326,4	312,6
03:34:00	45	565,2	545,7	69571,57	398	326,2	312,5
03:35:00	46	572,6	552,7	70585,19	402	326,3	312,5
03:36:00	47	581,7	561,2	72195,52	402,7	326,4	312,7
03:37:00	48	580,7	561,0	69411,81	402	326,7	313



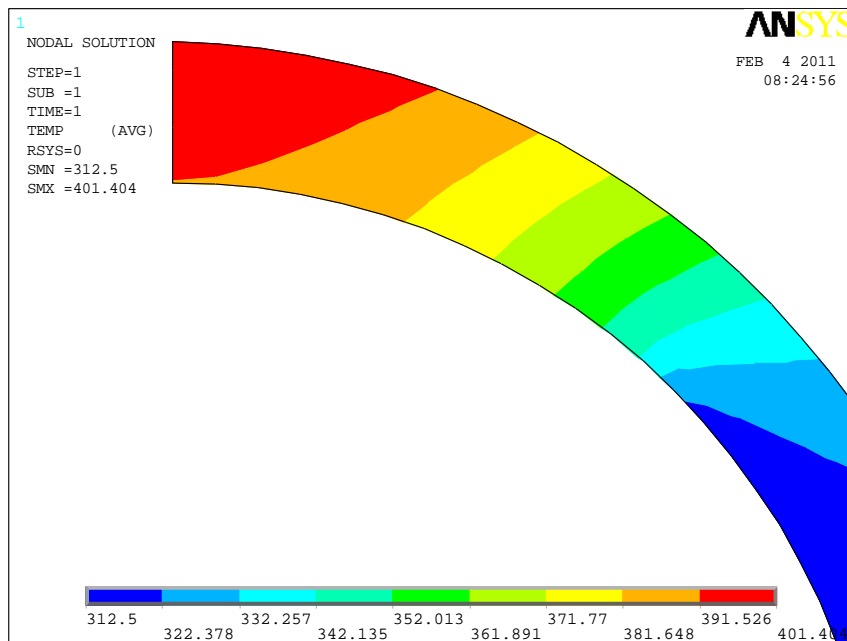
**Rys. 8.13.** Obliczenia temperatury w trzech punktach rury ekranowej (punkty: TS1, TS2, TS3) dla założonego obciążenia cieplnego  $q = 94\,899 \text{ [W/m}^2\text{]}$  i temperatury czynnika wynoszącej  $T_{cz} = 312,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$ . Współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$  w przedziale  $-45^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$  zmienia się od 500-1200  $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$ .



**Rys. 8.14.** Rozkład temperatury w przekroju ściany ekranowej dla założonego obciążenia cieplnego  $q_m = 94\,899 \text{ [W/m}^2\text{]}$  i temperatury czynnika wynoszącej  $T_{cz} = 312,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$ . Współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$  dla  $-45^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$  wynosi 900  $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$ .



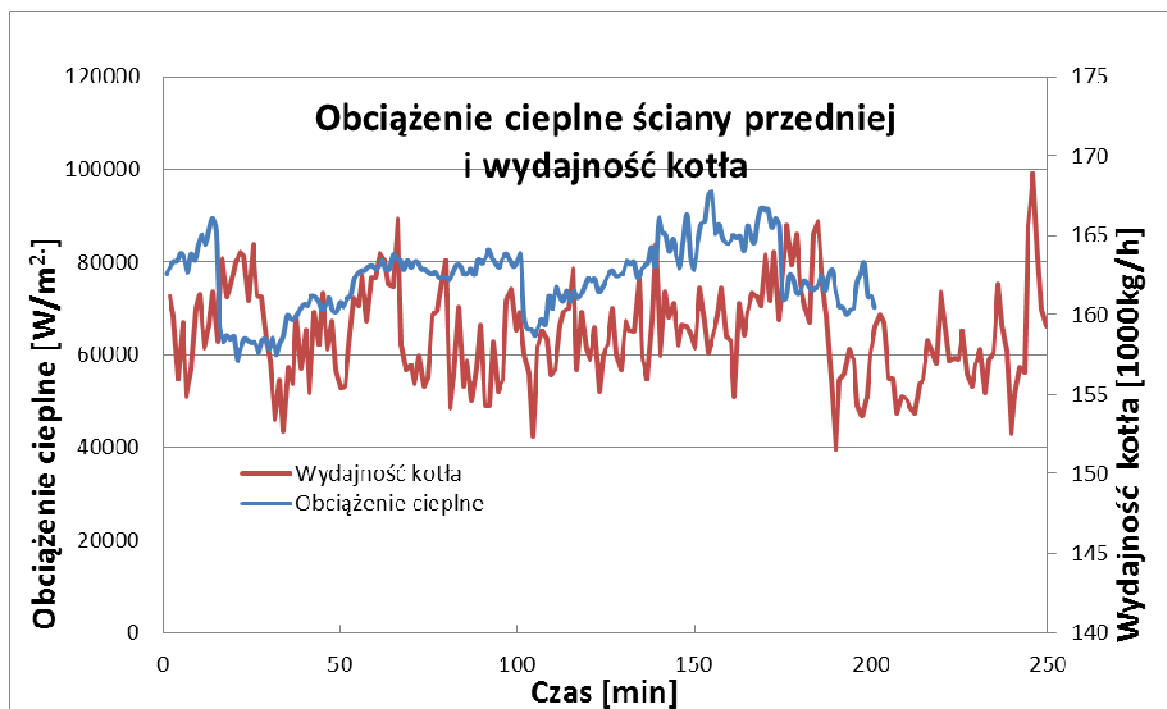
**Rys. 8.15.** Rozkład temperatury w przekroju płetwy dla założonego obciążenia cieplnego  $q_m = 94\ 899\ [\text{W}/\text{m}^2]$  i temperatury czynnika wynoszącej  $T_{cz} = 312,5\ [^\circ\text{C}]$ . Współczynnik wnikania ciepła w czołowej części rury  $\alpha = 900\ [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$ , a na pozostałej części obwodu  $\alpha = 30\ 000\ [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$



**Rys. 8.16.** Rozkład temperatury w przekroju wierzchołka rury dla założonego obciążenia cieplnego  $q = 94\ 899\ [\text{W}/\text{m}^2]$  i temperatury czynnika wynoszącej  $T_{cz} = 312,5\ [^\circ\text{C}]$ . Współczynnik wnikania ciepła w czołowej części rury  $\alpha = 900\ [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$ , a na pozostałej części obwodu  $\alpha = 30\ 000\ [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$



Dzięki zróżnicowaniu współczynnika wnikania ciepła na obwodzie rury uzyskano dobrą zgodność pomiędzy temperaturami obliczonymi za pomocą programu ANSYS a temperaturami zmierzonymi. Pomiar obciążenia cieplnego miernikiem Gardona dla prawej części ściany daje podobne wyniki jak metoda bazująca na pomiarach temperatury ściany. Zmiany obciążenia cieplnego ekranu kotła w dużym zakresie znajdują swoje odzwierciedlenie w zmianach wydajności masowej kotła, co możemy zaobserwować na rysunku 8.17.



**Rys. 8.17.** Zmiany obciążenia cieplnego  $q_m$  ściany przedniej oraz zmiany wydajności kotła.

Podsumowując analizy przeprowadzone w rozdziale 8 można stwierdzić, że metoda bazująca na pomiarze temperatury ekranu w trzech punktach jest mniej dokładna w porównaniu z miernikami Gardona lub mimośrodową wstawką termometryczną. Wynika to z trudności wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni rury.

## 9. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Wstawki mimośrodowe pozwalają na pracę w dłuższym okresie czasu w niszczącej atmosferze i wysokiej temperaturze spalin. Mogą być zatem użyte do wyznaczania lokalnego obciążenia cieplnego ekranów kotłów parowych. Dla potrzeb badań wstawki mimośrodowe zamontowano w ekranie szczelnym, w którym rury mają średnicę wewnętrzną 50 mm.

Sposób pomiaru temperatury i w konsekwencji obciążenia cieplnego ma jedną zasadniczą zaletę w stosunku do pomiarów już znanych. Rozkład temperatury nie jest zakłócany przez rury sąsiednie, ponieważ wstawka ta nie jest połączona ze ścianą szczelną przy pomocy płaskowników. Gdyby wstawka była przyspawana do sąsiednich rur ekranowych za pomocą płaskowników, to z uwagi na pogrubioną ściankę wstawki od strony paleniska należałoby analizować pole temperatury w sąsiednich rurach ekranowych. W celu wyznaczenia nieznanymi parametrów wystarczy przeanalizować rozkład temperatury w przekroju poprzecznym wstawki. Rozkład temperatury we wstawce wyznaczany jest metodą rozdzielania zmiennych. Zmiany obciążenia mogą być wyświetlane w trybie on-line na ekranie komputera bez konieczności używania komercyjnych programów MES do obliczania rozkładu temperatury. Pozwalają zatem obsłudze zareagować w odpowiednim czasie na niewłaściwą pracę kotła poprzez uruchamianie urządzeń czyszczących ekrany kotła.

Pomiar obciążenia cieplnego przy pomocy miernika Gardona jest stosunkowo łatwy – wynik otrzymuje się za pomocą prostych wzorów matematycznych bez stosowania złożonych algorytmów obliczeniowych. Mierniki Gardona zostały zamontowane na ścianie szczelnej wykonanej z rur o średnicy 76,1 mm i grubości 6,3 mm. Metoda pomiaru obciążenia cieplnego opiera się na pomiarze temperatury w dwóch punktach krążka przyspawanego do ściany szczelnej. Należy zwrócić uwagę, że miernik ten ze względu na swoją geometrię (element wystający ze ściany szczelnej) stanowi miejsce do osadzania się zanieczyszczeń. Zwłaszcza w kotłach pyłowych, gdzie unos popiołu w komorze paleniskowej jest znaczny, jest to mankament tego typu pomiarów. Zauważono znaczne różnice wyznaczonego obciążenia cieplnego po prawej i po lewej stronie ściany przedniej. Większa temperatura na brzegu miernika niż w jego środku wskazuje na gromadzenie się zanieczyszczeń, które zniekształcają wyniki badań. W takiej sytuacji obliczone obciążenie cieplne ma wartość mniejszą od zera. Pomiar, w wyniku których wyznaczone obciążenie cieplne ma wartość mniejszą od zera, należy odrzucić jako nieprawidłowe.

Gromadzenie się pyłu jako warstwy izolującej wokół mierników Gardona ma charakter cykliczny, co można zauważyć analizując przebiegi temperatury w czasie. kotłowej.

Pomiar obciążenia cieplnego przy pomocy pomiaru temperatury w trzech punktach rury ekranowej – w konkretnym przypadku rury o średnicy 76,1 mm i grubości 6,3 mm jest

zagadnieniem trudnym w praktycznej realizacji ze względu na trudny do zdiagnozowania charakter cyrkulacji. Można przypuszczać, że w obszarach rury ekranowej, najbardziej wysuniętych w stronę komory paleniskowej, następuje bardzo intensywne odparowanie, stąd niewielki współczynnik wnikania ciepła. Od strony obmurza temperatura rury jest praktycznie równa temperaturze nasycenia pary dla ciśnienia pracy kotła, stąd przypuszczenie, że przekrój rury ekranowej nie jest równomiernie wypełniony mieszaniną parowo-wodną. Różnice współczynnika wnikania ciepła na obwodzie rury utrudniają wyznaczenie prawidłowej temperatury płaskownika i rury co w konsekwencji obniża dokładność wyznaczania obciążenia cieplnego  $q_m$ .

Bardzo ciekawe jest spostrzeżenie, że zjawisko to nie występuje dla kotła o tej samej mocy, w którym rury ekranowe mają średnicę wewnętrzną 50 mm, co potwierdzono pomiarami przy użyciu wstawek mimośrodowych. Należy przyjąć, że dla rur o mniejszej średnicy następuje intensywniejsze podciąganie mieszanie pary i wody i cały przekrój rury ekranowej jest równomiernie wypełniony cyrkulującą mieszaniną.

Mimośrodowe wstawki termometryczne jako narzędzie do pomiaru obciążenia cieplnego wydają się bardziej odpowiednie ze względu na możliwość zamontowania kilku termoelementów w strefie poddanej największym obciążeniom cieplnym. Ze względu na niewielkie odstępstwo od geometrii ekranu, mimośrodowe wstawki termometryczne nie stanowią źródła do osadzania się zanieczyszczeń.

## Literatura

- [1] 6T10/0035/2002C/05798 Sprawozdanie z grantu celowego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i szkolnictwa Wyższego, Kraków 2005
- [2] J. Taler: Messung der Wärmebelastung der gasdicht verschweißten Verdampfer-Rohrwände in Dampferzeugern, VGB Kraftwerkstechnik, 70 Heft 8 (1990), pp. 644-650.
- [3] J. Taler, D. Taler: Tubular Type Heat Flux Meter for Monitoring Internal Scale Deposits in Large Steam Boilers, Heat Transfer Engineering, 28, No 3, (2007), pp. 230-239.
- [4] D. J. Littler, Editor: 1991 Modern Power Station Practice, Volume G: Station Operation and Maintenance, Pergamon Press, Oxford.
- [5] J. Taler, B. Węglowski, P. Duda, S. Grądziel, T. Sobota, A. Cebula, D. Taler: Computer system for monitoring power boiler operation, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Vol. 220, 2008, pp. 793-801 (w druku).
- [6] A. G. Blokh: 1988, Heat Transfer in Steam Boiler Furnace, Hemisphere Publishing Corporation, Washington.
- [7] N. V. Kuznetsov, V. V. Mitor, I. E. Dubovskij, E. S. Karasina, Editors: 1973, Standard Methods of Thermal Design for Power Boilers. Central Boiler and Turbine Institute, Energija, Moscow (in Russian).
- [8] C. Bergemann: 2004, Slag measurement promises better sootblowing, Modern Power Systems, Vol. 24, No 2, pp. 34-35.
- [9] J. Taler J, D.Taler: 2007, Tubular type heat flux meter for monitoring internal scale deposits in large steam boilers, Heat Transfer Engineering, Vol. 28, No3, pp. 230-239.
- [10] S.B.H.C. Neal, E.W. Northover, J. Preece: The measurement of radiant heat flux in large boiler furnances – II. Development of flux measuring instruments, Heat Mass Transfer, Vol. 23 (1980), pp. 1023-1031.
- [11] J. Taler: Meassung der lokalen Heizflächenbelastung in Feuerräumen von Dampferzeugern, Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK), 42 (1990) Nr 5, pp. 269-277.
- [12] B. Wessel, D. Rüsenberg, J. U. Schlenkert, I. Thiele, G. Karkowski: Betriebserfahrungen mit dem Block Niederaußem K, VGB PowerTech 11/2006, pp. 47-51.
- [13] J. Taler: 2007, Determination of local heat transfer coefficient from the solution of the inverse heat conduction problem, Forschung im Ingenieurwesen (paper accepted for publication in 2007).
- [14] J. Taler, D. Taler, A. Kowal: Measurements of absorbed heat flux and water-side heat transfer coefficient in water wall tubes, Heat Transfer and Renewable Energy Sources, HTRSE 2010, Uniwersytet Zachodniopomorski, Szczecin 2010.
- [15] M. J. Albrecht, S. E. Hawk: Attachable heat flux measuring device, Patent US 6,485,174 B1, Date of Patent: Nov. 26. 2002.
- [16] J. Taler, P. Duda: Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła, WNT, Warszawa 2003.

- [17] J. Taler: Metoda residuów ważonych i jej zastosowanie do obliczenia pól temperatury w elementach kotłów, Kraków 1983.
- [18] J. Taler, B. Węglowski, A. Cebula: An assessment of Polish power, *Modern Power Systems*, 2007, No. 5, pp. 13-17.
- [19] P. Savat: Operational Experiences in Co – firing Coal and Different Biomass, *VGB PowerTech* 2006, No. 11, pp. 79-83.
- [20] A. Paist, A. Poobus, T. Tiikma: Probes for measuring heat transfer parameters and fouling intensity in boilers, *Fuel* 81 (2002), pp. 1811-1818.
- [21] A. G. Blokh: Heat Transfer in Steam Boiler Furnace, Hemisphere Publishing Corporation, Washington 1988.
- [22] P. Orłowski, W. Dobrzański, E. Szwarc.: Kotły parowe, WNT, Warszawa 1979.
- [23] D. Taler, J. Taler: Uproszczona analiza radiacyjnej wymiany ciepła w przegrzewaczach kotłów, *Archiwum Energetyki* 37 (2007), nr 1-2, ss. 61-76.
- [24] J. Taler: Determination of local heat transfer coefficient from the solution of the inverse heat conduction problem, *Forschung im Ingenieurwesen* 71 (2007), pp. 69-78.
- [25] H. Tashiro, K. Koyata, T. Yamada: Development of local heat flux meter for boiler tubes, *Heat Transfer. Japanese Research* Jan. March 1981, Vol. 10, No 1.
- [26] P. Duda, J. Taler: A new method for identification of thermal boundary conditions in water – wall tubes of boiler furnaces *International Journal of Heat and Mass Transfer* March (2009), pp. 1517-1524.
- [27] Table Curve 3D, Version 2 for Win32, AISN Software Inc.