

Gerard KOSMAN

PRZYSPIESZENIE PROCESU STYGNIECIA GRUBOŚCIENNYCH KOLEKTORÓW KOTŁÓW PAROWYCH Z ZACHOWANIEM OGRANICZEŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

Streszczenie. Przedmiotem rozważań jest sposób wymuszonego (przyśpieszonego) chłodzenia grubościennych elementów ciśnieniowych kotłów parowych. Chodzi przede wszystkim o kolektory przegrzewacza pary. Elementy te znajdują się w przestrzeni międzystropowej, są często izolowane i z tego powodu stygną znacznie wolniej od walczaka, rur ekranowych i opadowych. Podano wyniki pomiarów temperatury kolektorów w czasie naturalnego i wymuszonego chłodzenia. Wyznaczono chwilowe i średnie prędkości chłodzenia.

FORCED COOLING OF THE THICK-WALL COLLECTORS OF STEAM BOILERS APPLYING THE STRENGTH CRITERIA

Summary. The problem of forced (increased) cooling of the thick – wall elements of the pressure steam boilers is investigated. The elements, as the steam superheater collectors are often insulated and hence cool down much slower than the boiler, the radiant tubes and the down pipes. The results of the temperature measurements of the collectors during natural and forced cooling are given. The instantaneous and mean values of the cooling rates were calculated.

EINE VERKÜTRZUNG DES KÜHLUNGSPROZESSES VON DAMPFERZEUGERSAMMLERN MIT EINBEZIEHUNG VON FESTIGKEITSBEGERNZUNGEN

Zusammenfassung. Als Basis der Erwägungen galt eine Methode der gezwungenen Kühlung eines unter Druck stehenden Dampferzeugern. Es geht nur um die Überhitzersammler. Diejenige befinden sich im Zwischenzug, haben eine Wärmedämmung und deswegen kühlen sich kleiner als die Trommel, Steigröhre und Abfallröhre ab. Es wurde die Resultaten von Messungen Wandtemperaturen der Sammlern in der Phase einer natürlichen und gezwungenen Kühlung

gegeben. Eine momentane und durchschnittliche Kühlungs-
geschwindigkeiten wurden ermittelt.

1. WPROWADZENIE

Dopuszczalne prędkości nagrzewania i chłodzenia grubościennych elementów ciśnieniowych kotłów parowych określa się na podstawie kryteriów wytrzymałościowych.

Rzeczywiste prędkości nagrzewania, występujące w czasie rozruchu kotłów, są zbliżone do wartości dopuszczalnych. Rzeczywiste prędkości stygnięcia są kilkakrotnie mniejsze. Naturalne stygnięcie elementów grubościennych odbywa się bardzo wolno. I tak np. stygnięcie grubościennych kolektorów znajdujących się w przestrzeni międzystropowej kotła do temperatury poniżej 100°C (wtedy dopiero, zgodnie z instrukcją eksploatacji kotłów parowych, można spuścić wodę z układu ciśnieniowego) trwa ok. 40 – 50 godz. Walczak, rury ekranowe i opadowe oraz przegrzewacz pary stygną kilkakrotnie szybciej (ok. 8 – 12 godz). Osiągnięcie podanego czasu stygnięcia wymaga jednak stosowania pewnych dodatkowych środków przyspieszających ten proces [1, 2].

Znane dotychczas sposoby przyspieszenia stygnięcia elementów ciśnieniowych kotłów parowych polegają na:

- odstawieniu kotła na parametrach poślizgowych,
- wymuszaniu przepływu powietrza przez komorę paleniskową, ciąg konwekcyjny i kanały spalin za pomocą wentylatorów oraz wymianie wody w całym obiegu.

Pierwszy sposób umożliwia tylko nieznaczne schłodzenie elementów ciśnieniowych kotła. Drugi sposób daje pozytywne rezultaty w odniesieniu do walczaka, rur ekranowych i opadowych oraz przegrzewacza pary. Po wychłodzeniu w ten sposób wymienionych elementów do temperatury poniżej 100°C, grubościenne kolektory znajdujące się w przestrzeni międzystropowej są jeszcze nagrzane do temperatury ponad 300°C.

Istota proponowanego wymuszonego chłodzenia kotłów sprowadza się do przyspieszenia procesu stygnięcia wszystkich elementów ciśnieniowych kotła, w tym również grubościennych kolektorów w przestrzeni międzystropowej. Wykorzystano tutaj doświadczenia z zakresu chłodzenia turbin parowych [3 oraz 4 – 8].

Zasadniczą częścią pracy są badania stanu cieplnego wybranego kolektora kotła parowego. Podano wyniki pomiarów temperatury kolektora w czasie naturalnego i wymuszonego chłodzenia. Wyznaczono chwilowe i średnie prędkości chłodzenia. Na tej podstawie można porównać intensywność chłodzenia naturalnego i wymuszonego. Zwiększenie prędkości i skrócenie czasu całego procesu w przypadku chłodzenia wymuszonego jest bardzo znaczne [9, 10].

2. KONCEPCJA CHŁODZENIA I PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA

Sposób przyspieszonego (wymuszonego) chłodzenia elementów ciśnieniowych kotłów parowych, zwłaszcza kolektorów w przestrzeni międzystropowej, polega na wprowadzeniu czynnika chłodzącego (np. powietrza pod ciśnieniem) do części ciśnieniowej kotła i odpowiednim jego kontrolowanym przepływie. Jako podstawowe kryterium prowadzenia procesu chłodzenia przyjęto dopuszczalne prędkości zmian temperatury metalu kolektorów, wynikające z przyjętych kryteriów wytrzymałościowych.

Jest to metoda, która umożliwi pełną kontrolę przebiegu procesu pod względem cieplnym i wytrzymałościowym. Jest to więc chłodzenie bezpieczne a jednocześnie bardzo efektywne ze względu na możliwość stosowania dużych prędkości chłodzenia.

Opracowany sposób chłodzenia elementów ciśnieniowych kotłów parowych spełnia następujące założenia:

a) chłodzenie prowadzone jest z możliwie największą prędkością, tzn.:

$$V = V_{\text{dop}} \quad (1)$$

Prędkość dopuszczalną V_{dop} określamy na podstawie kryteriów wytrzymałościowych. Maksymalne naprężenie zredukowane w poszczególnych elementach przyjmujemy równe wartości dopuszczalnej

$$\sigma_{\text{red,max}} = \sigma_{\text{dop}} \quad (2)$$

b) w pierwszych badaniach postanowiono (dla zwiększenia bezpieczeństwa) ograniczyć dopuszczalną prędkość chłodzenia do wartości

$$V_{\text{dop}} = 1 \text{ K/min} \quad (3)$$

Po przeprowadzeniu większej liczby chłódzeń, zweryfikowaniu metody chłodzenia i uzyskaniu bogatszych wyników doświadczeń można zwiększyć prędkość chłodzenia do wartości dopuszczalnej.

c) przepływ czynnika chłodzącego jest kontrolowany, a proces chłodzenia bezpieczny,

d) instalacja doprowadzenia i odprowadzenia czynnika chłodzącego oraz jej eksploatacja nie są skomplikowane. Czynnik chłodzący jest doprowadzany do układu tylko w jednym punkcie.

Określenie dróg przepływu czynnika chłodzącego przez część ciśnieniową kotła ma istotne znaczenie dla spełnienia przyjętych założeń. Czynnik chłodzący może być w zasadzie doprowadzony i odprowadzony w dowolnym punkcie układu. Wpływa to jednak na efektywność procesu. W rozwiązaniu optymalnym czynnik chłodzący może być doprowadzony albo do kolektora odpo-

wietrzeń, albo do kolektora odmulania i odwodnień, albo do rurociągu wody zasilającej przed podgrzewaczem wody.

Za pierwszym rozwiązaniem (kolektor odpowietrzeń) przemawiają względy praktyczne. Ścianki tego kolektora są cieńsze i wstawanie króćca doprowadzającego czynnik chłodzący jest prostsze.

Drugie rozwiązanie (kolektor odmulania i odwodnień) zapewnia lepsze zorganizowanie przepływu czynnika chłodzącego.

Odprowadzenie czynnika chłodzącego następuje poprzez rurociąg rozruchowy lub kolektor odwodnień przegrzewacza.

Istnieje też możliwość przepływu czynnika chłodzącego zgodnie z kierunkiem przepływu wody i pary w kotle.

O ostatecznym przyjęciu rozwiązania powinny decydować warunki lokalne uwzględniające np. łatwość dostępu do wybranego kolektora, a przede wszystkim łatwość podłączenia instalacji w czasie chłodzenia. Instalacja ta musi być zawsze w pełnej gotowości do chłodzenia i jednocześnie nie może wpływać na pracę całego bloku lub stwarzać możliwości jego uszkodzenia.

3. ZAKRES BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Przeprowadzone badania doświadczalne obejmowały pomiar i analizę przebiegów czasowych temperatur w czasie naturalnego i wymuszonego chłodzenia grubościennych kolektorów kotłów parowych [9].

Zgodnie z założeniem „b” w pierwszych badaniach postanowiono ograniczyć dopuszczalną prędkość chłodzenia do wartości $V = 1 \text{ K/min}$.

Zakres badań był następujący:

- pomiar temperatury kolektora w czasie naturalnego i wymuszonego chłodzenia,
- analiza uzyskanych przebiegów czasowych temperatur,
- wyznaczenie chwilowych i średnich prędkości chłodzenia,
- porównanie intensywności chłodzenia naturalnego i wymuszonego.

Do badań wybrano kocioł o wydajności 430 t/h oraz parametrach pary przegrzanej 13,8 MPa i 540°C. Z istniejącego układu punktów pomiaru temperatury metalu kolektorów w przestrzeni międzystopowej wybrano dwa charakterystyczne punkty i analizowano zarejestrowane przebiegi czasowe temperatur w czasie stygnięcia. Szczegółowa analiza dotyczyła następujących punktów:

- komora przegrzewacza końcowego pary świeżej,
- rura obwiedniowa przegrzewacza końcowego.

4. STYGNIECIE NATURALNE

Proces stygnięcia naturalnego analizowano w czasie dwóch kolejnych odstawień bloku (pomiar nr 1 i 2). Wyniki pomiarów temperatury metalu metalu komory i rury przegrzewacza końcowego w czasie stygnięcia przedstawiono na rys. 1 i 2. W pierwszym przypadku odstawienie kotła nastąpiło z pełnych parametrów pary. Początkowe temperatury metalu przekroczyły 500°C. Przed drugim odstawieniem bloku obniżono parametry pary i dlatego początkowe temperatury metalu są niższe.

Przedstawione na rys. 1 i 2 zmiany temperatury grubościennych elementów kotła w procesie naturalnego chłodzenia są typowymi przebiegami spadku temperatur po wyłączeniu bloku energetycznego z ruchu. Proces przebiega bardzo wolno. Czas potrzebny do osiągnięcia temperatury 100°C przekracza 3 dni.

Temperatury metalu kolektora przegrzewacza pary mierzono z krokiem czasowym $\Delta t = 0,5$ h (rys. 1 i 2). Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono średnie prędkości chłodzenia

$$V_i = T_i - \frac{T_{i-1}}{\Delta T} \quad (4)$$

w kolejnych przedziałach czasu Δt .

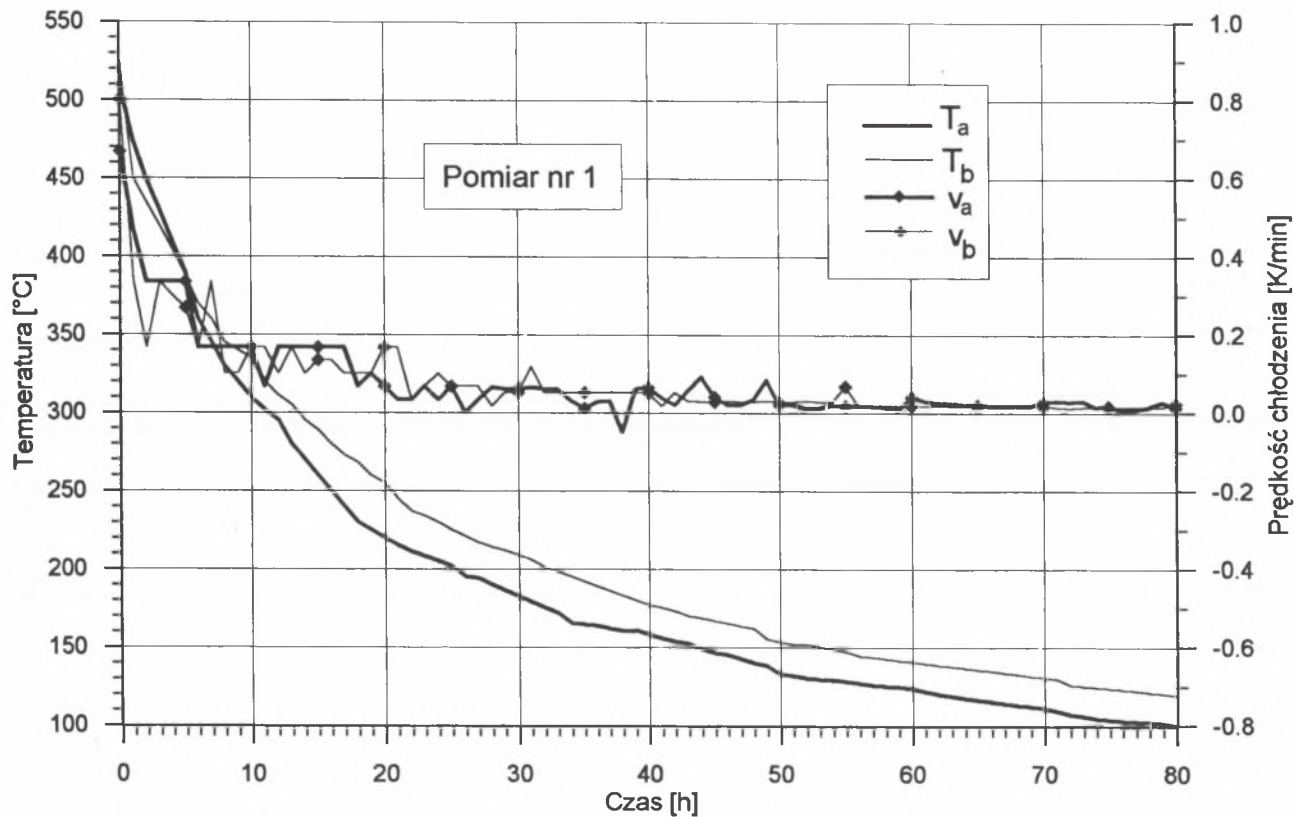
Prędkość stygnięcia elementów grubościennych tuż po odstawieniu kotła, nie licząc pierwszego, bardzo krótkiego okresu, waha się w granicach 0,15 – 0,2 K/min (rys. 1 i 2). W strefie średnich temperatur (250 – 150°C) prędkość ta spada do wartości 0,04 – 0,06 K/min, a poniżej temperatury 150°C wynosi 0,02 K/min i mniej.

5. CHŁODZENIE WYMUSZONE

Wykonano 3 cykle badań chłodzenia wymuszonego (pomiar nr 3, 4 i 5). W trakcie całego procesu kontrolowano stan termiczny grubościennych elementów ciśnieniowych kotła. Rejestrowano przebiegi czasowe temperatury w 2 punktach przegrzewacza końcowego [9].

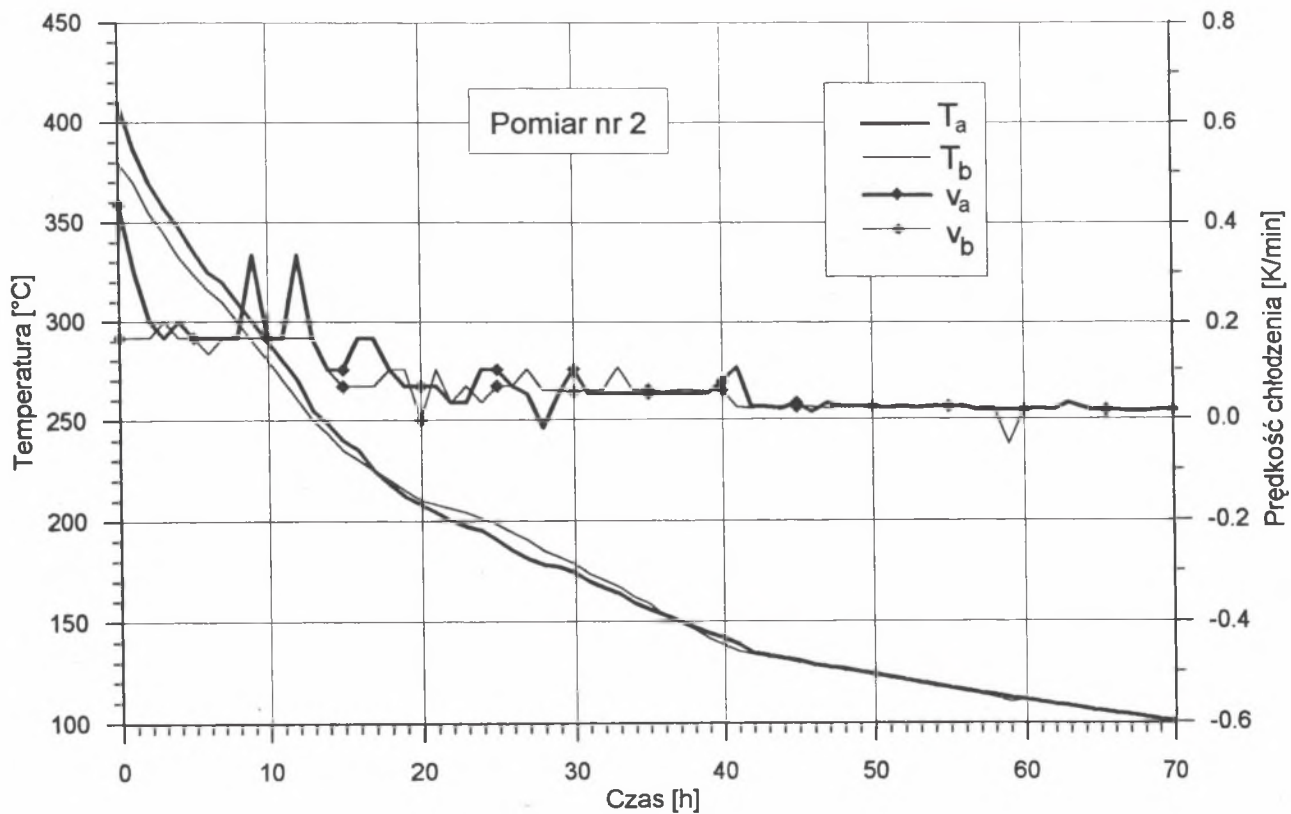
Wyniki badań przedstawiono na rys. 3 – 5. Wymuszone chłodzenie kotła prowadzono zgodnie z zasadami podanymi w punkcie 2. Pierwszy cykl badań (pomiar nr 3) obejmował łącznie 23,5 h chłodzenia z nominalnych parametrów pary. Proces chłodzenia podzielono na 3 etapy (rys. 3):

- I – chłodzenie wymuszone (czas trwania 5,5 h),
- II – chłodzenie naturalne (14,5 h),
- III – chłodzenie wymuszone (3,5 h).



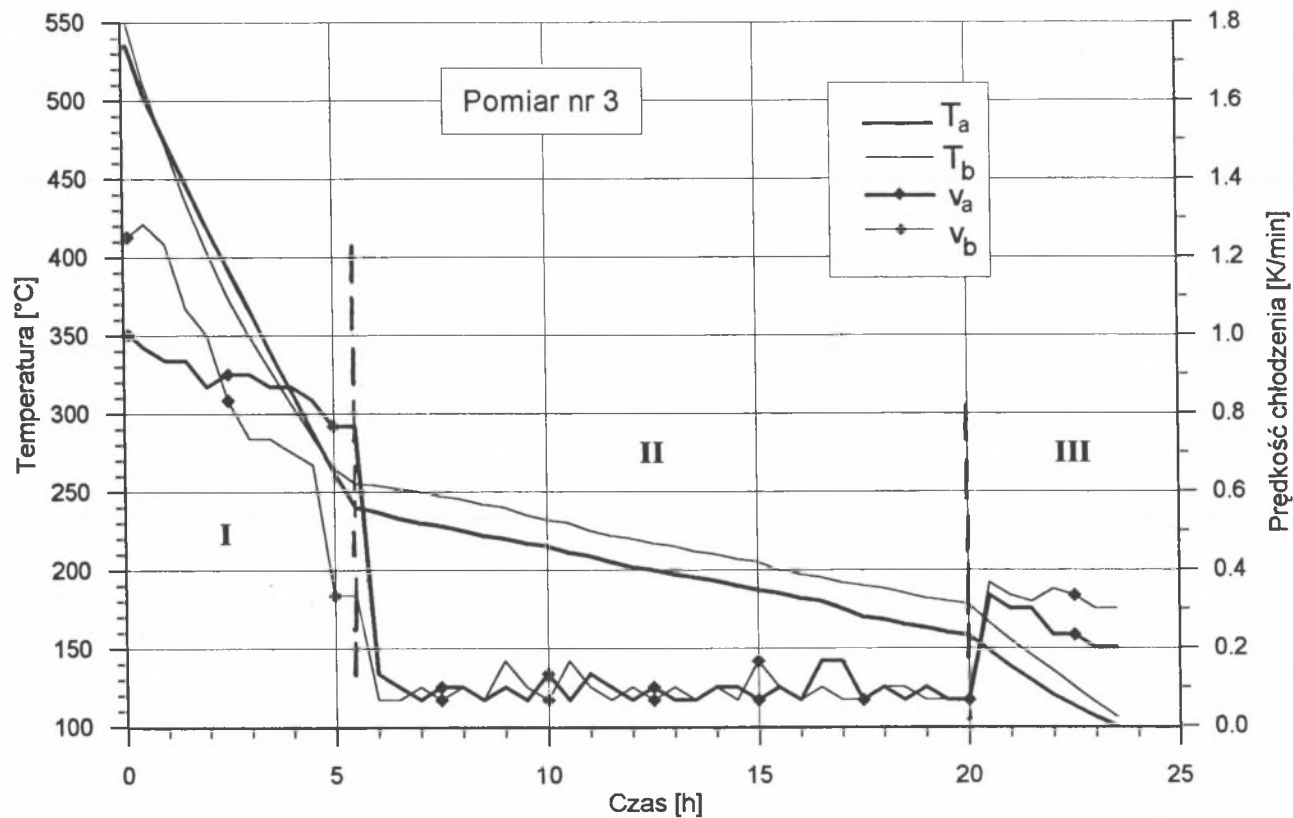
Rys. 1. Stygnięcie naturalne, temperatury w 2 punktach przegrzewacza (T_a , T_b) i prędkości chłodzenia (v_a , v_b) – pomiar nr 1

Fig. 1. Natural cooling, temperature in 2 points of superheater (T_a , T_b) and cooling rate (v_a , v_b) – measurement 1



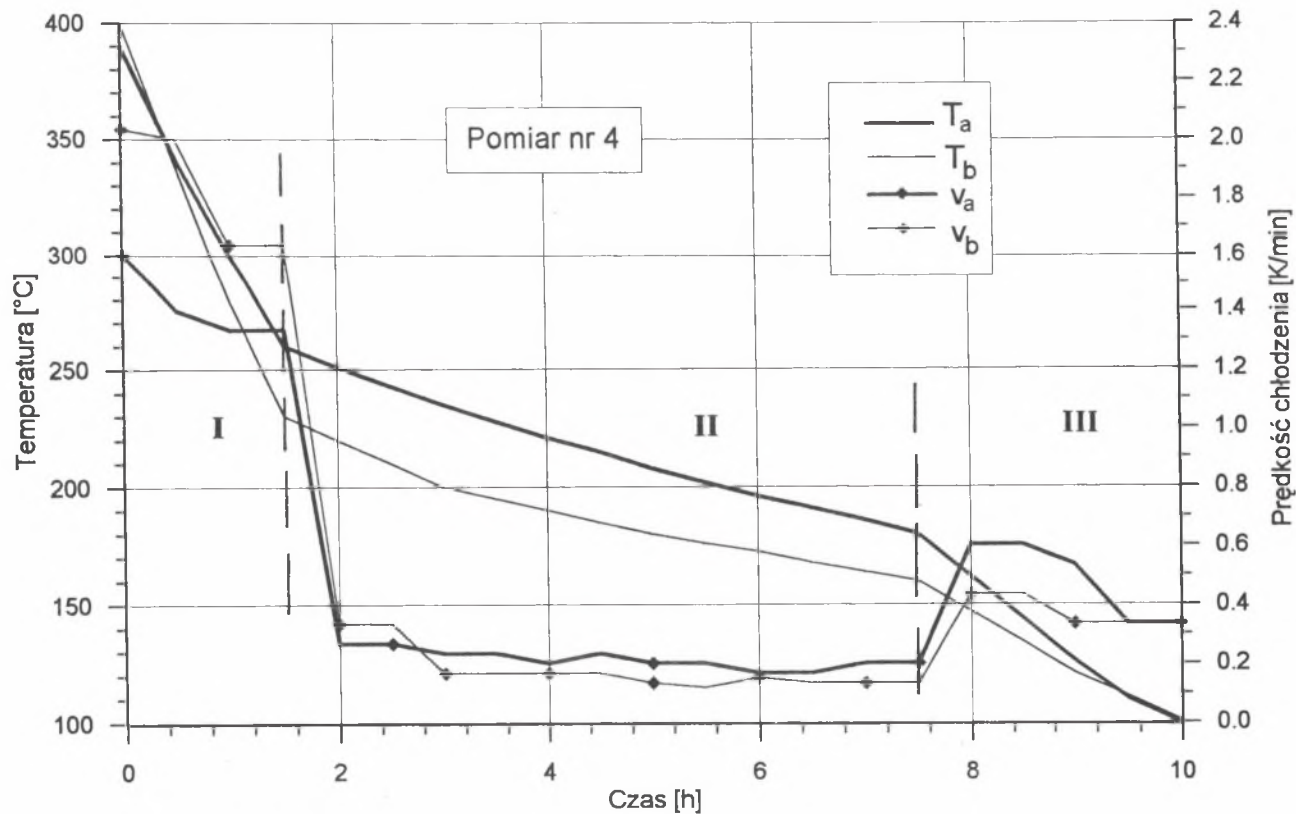
Rys. 2. Stygnięcie naturalne, temperatury w 2 punktach przegrzewacza (T_a i T_b) i prędkości chłodzenia (V_a i V_b) – pomiar nr 2

Fig. 2. Natural cooling, temperature in 2 points of superheater (T_a , T_b) and cooling rate (V_a , V_b) – measurement 2



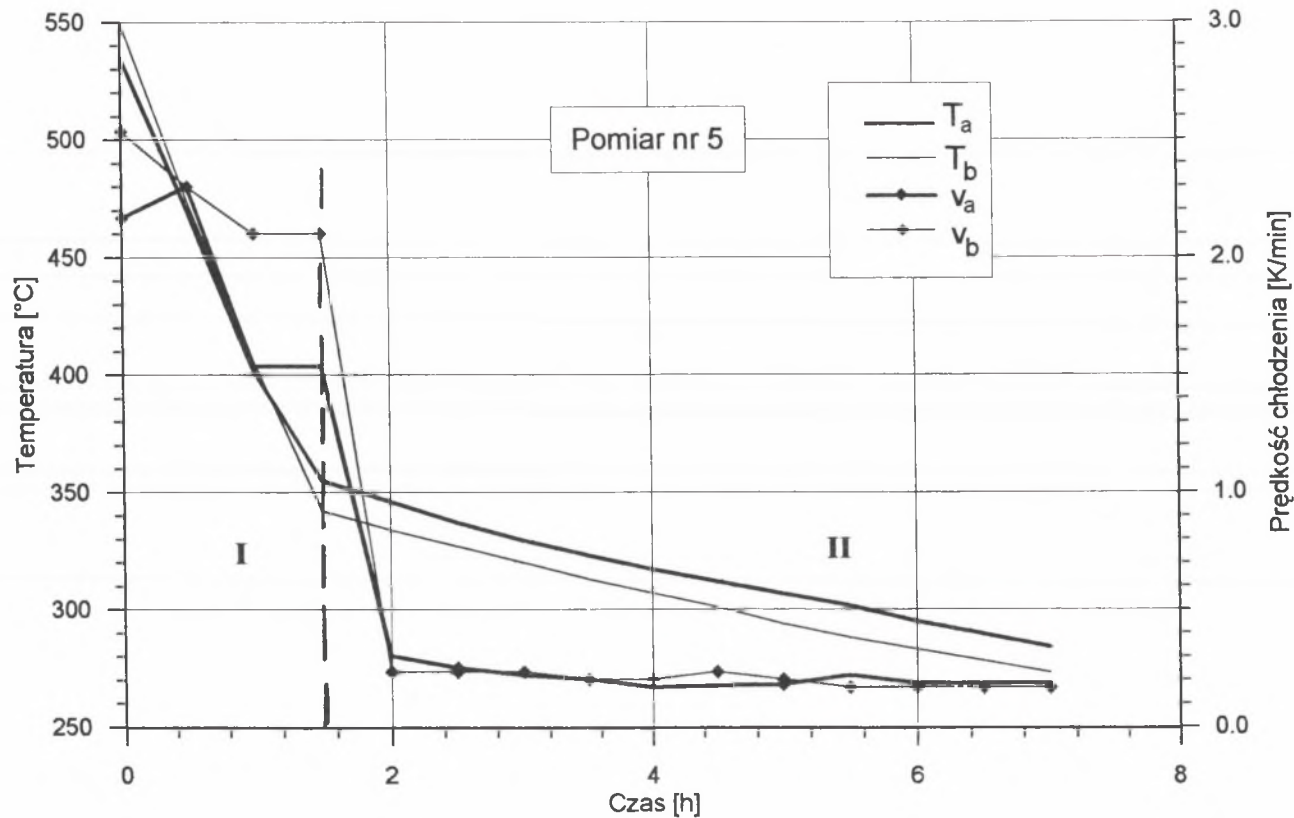
Rys. 3. Przebieg czasowy temperatury i prędkości chłodzenia (cykl badań nr 3), I, II, III – etapy chłodzenia

Fig. 3. Time variation of temperature and cooling rate (test 3), I, II, III – steps of cooling



Rys. 4. Przebieg czasowy temperatury i prędkości chłodzenia (cykl badań nr 4), I, II, III – etapy chłodzenia

Fig. 4. Time variation of temperature and cooling rate (test 4), I, II, III – steps of cooling



Rys. 5. Przebieg czasowy temperatury i prędkości chłodzenia (cykl badań nr 5), I, II – etapy chłodzenia

Fig. 5. Time variation of temperature and cooling rate (test 5), I, II – steps of cooling

Pomiar nr 4 podzielono również na 3 etapy (rys. 4):

- I – chłodzenie wymuszone (czas trwania 1,5h),
- II – chłodzenie naturalne (6 h),
- III – chłodzenie wymuszone (2,5 h).

Proces chłodzenia prowadzono po odstawieniu kotła na parametrach poślizgowych. Początkowe temperatury metalu były równe 380 – 400°C.

Ostatni cykl badań (pomiar nr 5) obejmował pierwsze 7 h chłodzenia z nominalnych parametrów pary. Badany okres chłodzenia podzielono na 2 etapy (rys. 5):

- I – chłodzenie wymuszone (czas trwania 1,5 h),
- II – chłodzenie naturalne (5,5 h).

Wszystkie zarejestrowane przebiegi czasowe temperatury metalu wskazują wyraźne zmiany tempa chłodzenia w kolejnych etapach tego procesu. Przejście z chłodzenia wymuszonego do naturalnego lub odwrotnie powoduje zauważalne załamanie krzywych stygnięcia. Ocenę jakościową tego faktu umożliwia porównanie prędkości chłodzenia. Na rys. 3 – 5 podano, obok przebiegów czasowych temperatury w 2 punktach przegrzewacza $T_a(t)$ i $T_b(t)$, odpowiadające im prędkości chłodzenia $V_a(t)$ i $V_b(t)$, wyznaczone z zależności (4). Są to średnie prędkości chłodzenia w kolejnych przedziałach czasu $\Delta t = 0,5$ h.

Sterując odpowiednio strumieniem powietrza chłodzącego można zmieniać prędkość chłodzenia. W przypadku całkowitego odcięcia powietrza wszystkie elementy stygną w sposób naturalny. W celu zwiększenia prędkości chłodzenia należy zwiększyć strumień powietrza. Wymaga to jednak, przy istniejących oporach przepływu w układzie ciśnieniowym kotła, wydatnego zwiększenia ciśnienia powietrza w instalacji zasilającej układ do wymuszonego chłodzenia. W praktyce nie zawsze to jest możliwe.

6. ANALITYCZNY OPIS CHŁODZENIA, PORÓWNANIE PRĘDKOŚCI CHŁODZENIA NATURALNEGO I WYMUSZONEGO

Proces chłodzenia z dobrym przybliżeniem opisuje zależność wykładnicza temperatury od czasu

$$T(\mathbf{x}, t) = A + B \exp(-mt) = A + B \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) \quad (5)$$

gdzie:

$A(\mathbf{x})$, $B(\mathbf{x})$ – funkcje uwzględniające zależność temperatury od współrzędnych i warunków chłodzenia (dla ustalonego punktu ciała są to wartości stałe), t stała czasowa, $m = 1/t_0$ tempo chłodzenia. Warto zauważyć, że funkcje A i B mają bardo pro-

tą interpretacją fizyczną. Opisują temperaturę początkową i końcową elementu.

Podana aproksymacja umożliwia w prosty sposób wyznaczenie chwilowych prędkości chłodzenia w różnych fazach tego procesu (chłodzenie naturalne lub wymuszone). Na podstawie zależności (5) prędkość chłodzenia jest równa

$$V = -mB \exp(-mt) \quad (6)$$

Według podanych zależności aproksymowano wszystkie zarejestrowane w czasie badań chłodzenia naturalnego i wymuszonego przebiegi czasowe temperatur kolektora przegrzewacza (rys. 1 – 5). Uzyskane wyniki aproksymacji podano w tablicy 1.

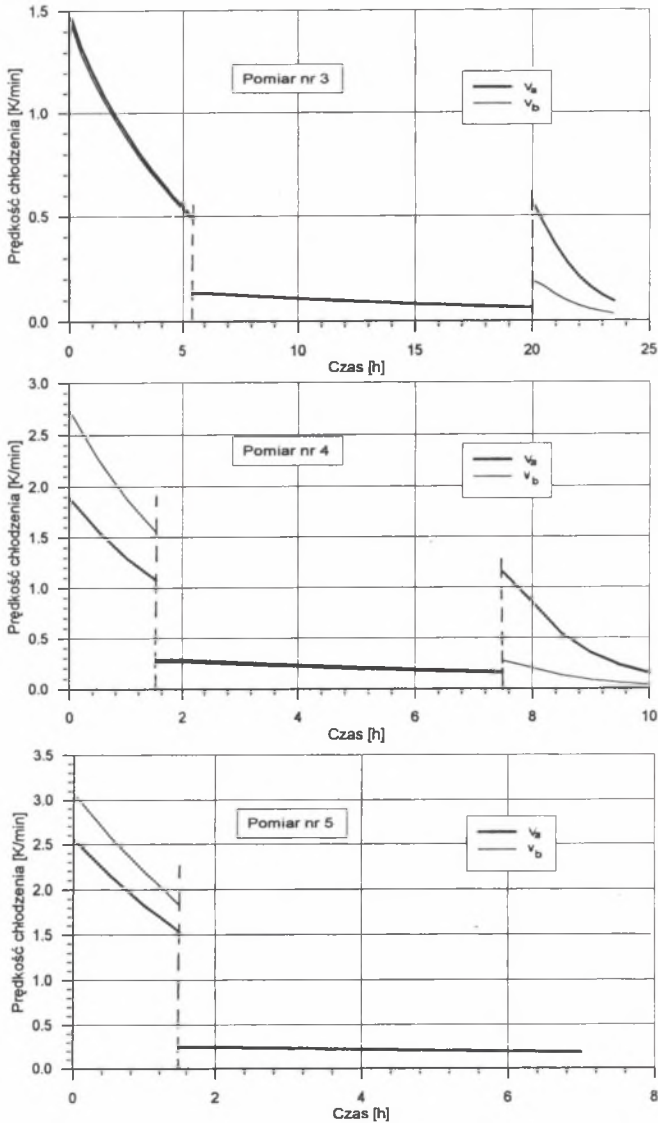
Tablica 1

Aproksymacja procesu chłodzenia

Pomiar	Chłodzenie	Punkt	B	m
1	naturalne	a	384	0,0475
		b	364	0,0373
2	naturalne	a	305	0,0446
		b	300	0,0454
3	wymuszone	a	445	0,1977
		b	460	0,1864
	naturalne	a	202	0,0546
		b	209	0,0434
4	wymuszone	a	300	0,3787
		b	310	0,5300
	naturalne	a	199	0,1060
		b	166	0,1155
5	wymuszone	a	445	0,3456
		b	460	0,4012
	naturalne	a	288	0,0567
		b	275	0,582

Na podstawie uzyskanych aproksymacji porównano prędkości chłodzenia w poszczególnych fazach tego procesu. Zmianę prędkości chłodzenia w czasie pomiarów nr 3, 4 i 5 pokazano na rys. 6. Prędkości chłodzenia naturalnego i wymuszonego różnią się zdecydowanie. Należy przy tym zauważyć, że w czasie badań nie udało się w pewnych przypadkach spełnić przyjętego w punkcie 2.b założenia o ograniczeniu dopuszczalnej prędkości chłodzenia do wartości $V_{dop} = 1 \text{ K/min}$. Uzyskana prędkość chłodzenia nie przekracza jednak

wartości dopuszczalnej wynikającej z przyjętego kryterium wytrzymałościowego (2).



Rys. 6. Porównanie prędkości chłodzenia naturalnego i wymuszonego

Fig. 6. The comparison of the natural and forced cooling rates

Zgodnie z (6) prędkość chłodzenia maleje w czasie procesu. Sytuacja ta występuje w czasie chłodzenia naturalnego i wymuszonego. Zmieniając strumień powietrza chłodzącego można utrzymywać prędkość chłodzenia wymuszonego na stałym poziomie.

Zwiększenie prędkości chłodzenia prowadzi do skrócenia tego procesu w porównaniu z stygnięciem naturalnym. Porównanie rys. 1 i 2 z pierwszą fazą chłodzenia wymuszonego w czasie pomiaru nr 3 wskazuje, że jest możliwe skrócenie całego procesu z 70 – 80 h do ok. 8 – 10 h. Ostatnie wartości uzyskano z rys. 3 po przedłużeniu przebiegu fazy I do temperatury metalu 100°C.

7. UWAGI KOŃCOWE

Badania stanu termicznego grubościennego kolektora przegrzewacza pary wraz z analizą uzyskanych prędkości chłodzenia przeprowadzono w celu sprawdzenia opracowanej koncepcji chłodzenia wymuszonego i przyjętych założeń. Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość przyspieszenia procesu stygnięcia elementów kotła i praktyczną przydatność proponowanej metody prowadzenia tego procesu.

Potrzeba przyspieszenia procesu stygnięcia istnieje w sytuacjach awaryjnych, np. wtedy, gdy należy usunąć wykryte nieszczelności w części ciśnieniowej kotła. Prace takie można wykonać dopiero po spuszczeniu wody. Po usunięciu awarii (np. po zaspawaniu nieszczelności) należy przeprowadzić próbę wodną, tzn. zalać wodą całą przestrzeń ciśnieniową łącznie z wspomnianymi wyżej kolektorami. Próbę wodną można przeprowadzić dopiero po wychłodzeniu wszystkich elementów części ciśnieniowej kotła (w tym również kolektorów).

LITERATURA

- [1] Modern Power Station Practice. British Electricity International. Pergamon Press, London 1991.
- [2] Allianz Handbook of Loss Prevention. VDI Verlag, Berlin 1987.
- [3] Kosman G.: Przyspieszenie procesu stygnięcia turbin parowych. Zeszyty Naukowe Pol. Gdańskiej nr 445, Gdańsk 1989.
- [4] Cantuniar C.: Zwangsabkühlung von Turbin grosser Leistung. Brown – Boveri – Mitteilungen, Baden 1975, z. 2.
- [5] Hennig, T.: Erfahrungen mit dem schnellen Abkühlen grosser Dampf turbinen. Elektrizitätswirtschaft. 1972, z. 24.

- [6] Kastens, Th. et al: Zwangsabkühlung von Turbinen der 500 MW Blöcke durch Ansaugen von Luft. *Energietechnik* 1984, z. 7.
- [7] Kastens, Th. et al: Kaltfahren des 500 MW Turbosatzes mit Fremddampf. *Energietechnik* 1985, z. 7.
- [8] VGB–Merkblatt. Schnellabkühlen von Dampfturbinen. Berlin 1986.
- [9] Praca zbiorowa. Pomiary temperatury kolektora przegrzewacza pary w czasie naturalnego i wymuszonego chłodzenia. Opracowanie IMiUE Pol. Śl., Gliwice 1994.
- [10] Bryjak R.: Magisterska praca dyplomowa. IMiUE Pol. Śl., Gliwice 1994.

Abstract

The problems of the forced (increased) cooling of the thick – wall elements of the pressure steam boilers are discussed. The elements, as the steam superheater collectors, are often insulated and therefore cool down at a much slower rate than the boiler, the radiant tubes and the down pipes. The forced cooling method includes:

- the selection of the cooling medium,
- the organisation of the cooling medium flow through the pressure part of the boiler,
- the selection of the amount and parameters of the cooling medium determining the cooling rate,
- the development of a method of control of the thermal state of the thick – walled pressure elements of the boiler during cooling,
- the determination of the allowable cooling rate.

The main part of the paper is devoted to the investigation of the thermal condition of a selected collector of a steam boiler. The temperature measurement results of the collectors during natural and forced cooling are presented. The instantaneous and mean values of the cooling rate have been determined, allowing the comparison of the intensities of natural and forced cooling. The increase in the cooling rate and the reduction in the whole process duration in case of the forced cooling are very significant.