

Jerzy GOŁĄBEK

Centralne Biuro Konstrukcji Kotłów
w Tarnowskich Górach

ROZKŁAD TEMPERATUR SPALIN W STREFIE PRZEGRZEWACZY GRODZIOWYCH KOTŁA
OP 650

Streszczenie: Przedstawiono sposób pomiaru rozkładu temperatur spalin między przegrzewaczami grodziowymi na szerokości kotła OP650 w El.Kozienice, za pomocą termopar aspiracyjnych chłodzonych wodą. Pomiary przeprowadzono przy wydajnościach kotła rzędu 55,95 i 100% przy pracy zarówno dolnych jak i górnych rzędów palników. Obliczono wartości średnie przy użyciu prędkości spalin jako czynnika wagowego. Dla porównania również obliczono temperatury spalin dla zmierzonych parametrów pracy kotła i aktualnie spalanego paliwa przyjmując współczynniki zanieczyszczeń powierzchni zasadniczo wg norm radzieckich i ITC. Różnice temperatur określonych tymi dwiema metodami wynoszą 60 - 100 deg.

1. Wprowadzenie

W obliczeniach projektowych, a zwłaszcza przy sporządzaniu bilansów cieplnych poszczególnych powierzchni ogrzewalnych kotłów parowych istotne znaczenie ma oszacowanie nieuniknionych różnic między temperaturami przepływających czynników - obliczonymi a występującymi potem w rzeczywistości w różnych warunkach eksploatacyjnych.

Oszacowania takie jako wytyczne do projektowania mogą być uzyskane wyłącznie na podstawie badań rzeczywistych kotłów.

Decydującym dla wyników całości obliczeń cieplnych są temperatury spalin na wylocie z komory paleniskowej i za kotłem. Z tego względu waga ich określenia w tych właśnie miejscach jest duża i na świecie dąży się do udoskonalenia odpowiednich metod i technik pomiarowych [1, 2].

Pomiar temperatury spalin na wylocie z komory paleniskowej następuje z dużymi trudnościami technicznymi, zarówno ze strony aparatury jak i przygotowania samego kotła. Tradycyjnie do tego celu służą termopary aspiracyjne /zasysające/, ale podejmowane są z powodzeniem prace nad wykorzystaniem akustycznych metod pomiaru rozkładu temperatury w dowolnym przekroju kanału spalinowego kotła [2].

Znacznie mniej kłopotliwe, jeśli chodzi o przygotowania, a równie przydatne dla weryfikacji obliczeń i danych projektowych mogą być pomiary wykonywane w strefie przegrzewaczy grodziowych.

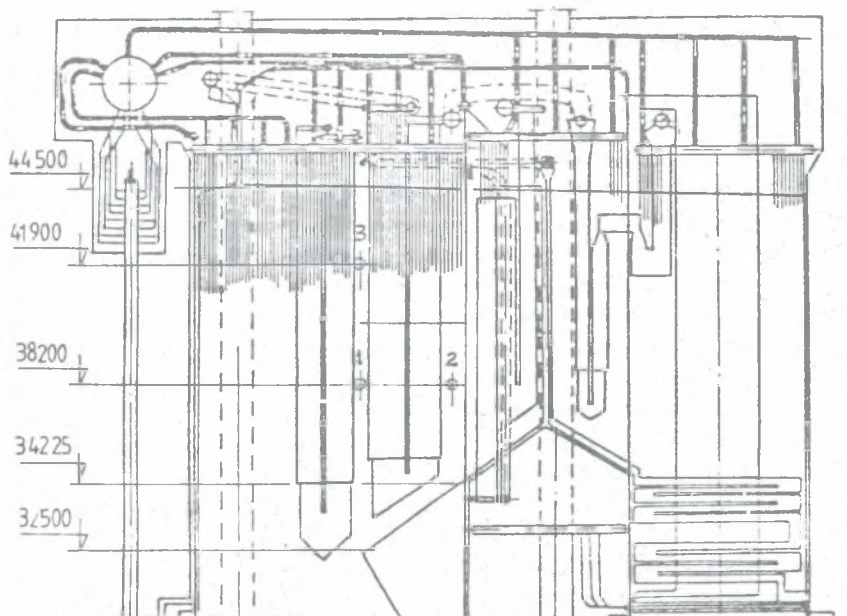
Częstością obszernych badań cieplnych kotła OP650-040 w El.Kozienice były między innymi pomiary rozkładu temperatur spalin między przegrzewaczami grodziowymi, a w szczególności za II stopniem, przegrzewacza pary świeżej i II stopniem przegrzewacza pary międzystopniowej [3].

Podstawowym celem tych pomiarów było porównanie uzyskanych wyników z danymi projektowymi.

2. Metoda i aparatura pomiarowa

Pomiary wykonano termoparami zasysającymi typu LAND SU-4 produkcji brytyjskiej w dwóch otworach za przegrzewaczem pary świeżej i jednym otworze za przegrzewaczem pary międzystopniowej umiejscowionych w booznych ścianach kotła, tak jak to pokazano na rys. 1. Wykorzystano otwory po zdmuchiwaczach popiołu jak również ich przewodnice, które posłużyły do zawieszenia termopar. Dzięki temu całe przygotowania sprowadziły się tylko do zdemontowania trzech zdmuchiwaczy z każdej strony kotła i wykonania odpowiednich zamknięć otworów /dławic/.

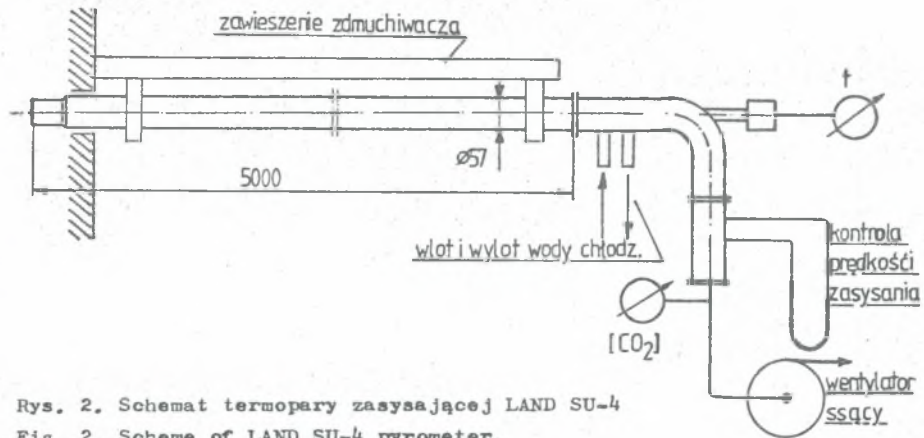
Termopary były wprowadzane jednocześnie na określoną, tę samą głębokość w przeciwnych otworach obu stron kotła.



Rys. 1. Rozmieszczenie otworów sondowania między przegrzewaczami kotła
Arrangement of probing holes between superheaters of boiler

Robocza długość termopary wynosiła około 5 metrów, co pozwoliło na pomiary w 2/3 szerokości kotła /5 m z każdej strony/, w punktach rozmieszczonych co 0,5 m. Termopara na całej długości była chłodzona wodą, której strumień w miarę jej zanurzania był stopniowo zwiększany. Schemat

termopary przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat termopary zasysającej LAND SU-4

Fig. 2. Scheme of LAND SU-4 pyrometer.

Spaliny zasysano za pomocą wentylatora ssącego, tak aby we wlocie do ceramicznej wkładki umieszczonej na końcu termopary, w której znajdował się osłonięty przed promieniowaniem czujnik termoelementu Pt-13RhPt, prędkość ich wynosiła ok. 150 m/s.

Dokładność pomiaru temperatury wynosiła $-8 \pm -15^{\circ}\text{C}$.

Jednocześnie z odczytem temperatury pobierano próbkę spalin do aparatu Orsata celem określenia zawartości CO₂.

3. Parametry pracy kotła

Pomiary wykonano w kotle nr 3 przy sześciu różnych stanach jego pracy, które można zgrupować w dwie serie/dolne i górne rzędy pracujących palników/ po trzy pomiary przy trzech różnych obciążeniach. Podstawowe parametry pracy zawiera tabela 1.

4. Rozkład temperatur spalin

Na rys. 3 przedstawiono w formie wykresów wyniki pomiarów. Już tutaj można zauważyć, że w przypadku pracy górnych rzędów palników /II, III, IV/ temperatura za rozpatrywanymi przegrzewaczami wzrasta w niewielkim stopniu w porównaniu z pracą dolnych rzędów. Większe różnice występują przy niskich obciążeniach wynikające z większej różnicy wysokości płomienia w komorze paleniskowej.

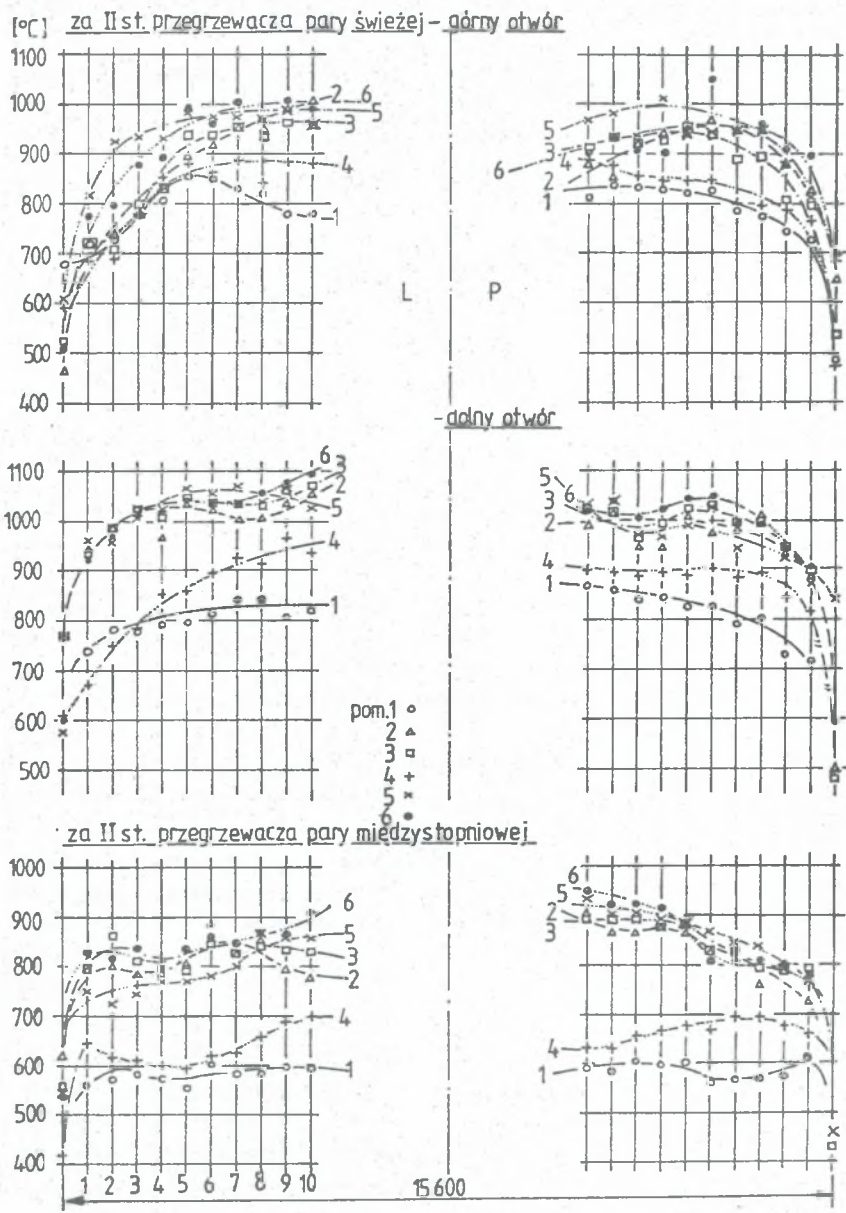
Średnie temperatury spalin wzdłuż osi sondowania obliczono wg wzoru:

$$\bar{t} = \frac{1}{a \cdot b \cdot \bar{w}} \left[\sum_0^{12} (a_i w_i t_i)_L + \sum_0^{12} (a_i w_i t_i)_P \right] \cdot b \quad (1)$$

gdzie - $a = 15,6$ m, szerokość kotła,
 a_i - szerokość elementarna, w której istnieje średnia prędkość spalin w_i i temperatura t_i .
 Zgodnie z rys. 4 przyjęto $a_0 = 0,25$ m; $a_1 - a_{10} = 0,5$ m;
 $a_{11} = 1$ m; $a_{12} = 1,55$ m;
 b - wysokość kanału spalin,
 L, P - strona lewa i prawa kotła.

Tabela 1

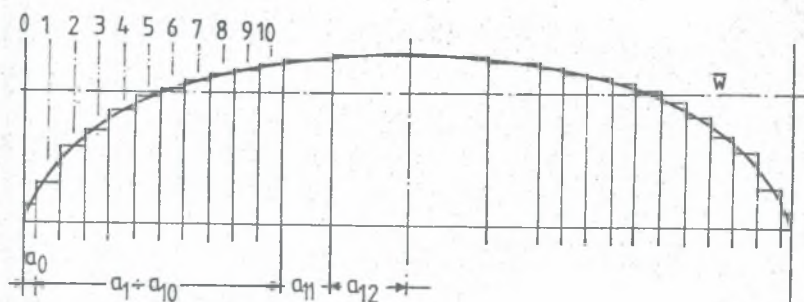
Pomiar nr	1	2	3	4	5	6	
Pracujące rzędy palników	I, II	I, II, III	I, II, III	III, IV	II, III, IV	II, III, IV	
Wydajność kotła	t/h	372	615	665	360	618	658
	%	57	95	102	55	95	101
Ciśnienie pary na wylocie	MPa	12,95	12,85	12,85	12,95	12,85	12,85
Temperatura pary świeżej przed II st. przeg.	°C	410	412	410	389	405	397
Temp. pary świeżej za II st. przeg.	°C	495	490	491	490	486	489
Temp. pary świeżej na wylocie	°C	515	530	525	533	530	524
Temp. pary m. stop. przed II st. przeg.	°C	338	330	360	335	330	345
Temp. pary m. stop. za II st. przeg.	°C	430	453	475	465	460	470
Temp. pary m. stop. na wylocie	°C	505	530	529	530	530	530
Strumień wody schł. do pary świeżej	t/h	11	40	35	50	69	80
Strumień wody schł. do pary m. stop.	t/h	9	32	25	19	48	45
Wartość opalowa węgla	kJ/kg	22960	21720	20330	20460	17790	19850
Zawartość wilgoci higroskop.,	%	2,47	3,81	2,32	2,95	3,47	2,06
Zawartość wilgoci całkowitej	%	10,82	11,23	11,77	11,76	11,46	11,46
Zawartość popiołu	%	14,83	16,81	21,39	20,31	28,96	22,79



Rys. 3. Wyniki pomiaru rozkładu temperatur spalin

Fig. 3. Results of flue gas temperature distribution measurements

Dla punktów położonych w środkowej części kanału temperatury wyznaczono przez interpolację $/t_{11}, t_{12}/$.
Prędkość spalin w poszczególnych punktach pomiaru temperatury, średnią w elementarnych polach, wyznaczono przyjmując rozkład prędkości w przekroju jak dla przepływu turbulენტnego [1] - rys. 4.



Rys. 4. Przyjęty do obliczeń profil prędkości spalin.

Fig. 4. Flue gas velocity profile assumed for calculations

Rozpatrując położenie otworów względem dolnej i górnej powierzchni ograniczającej kanał, przyjęto, że:

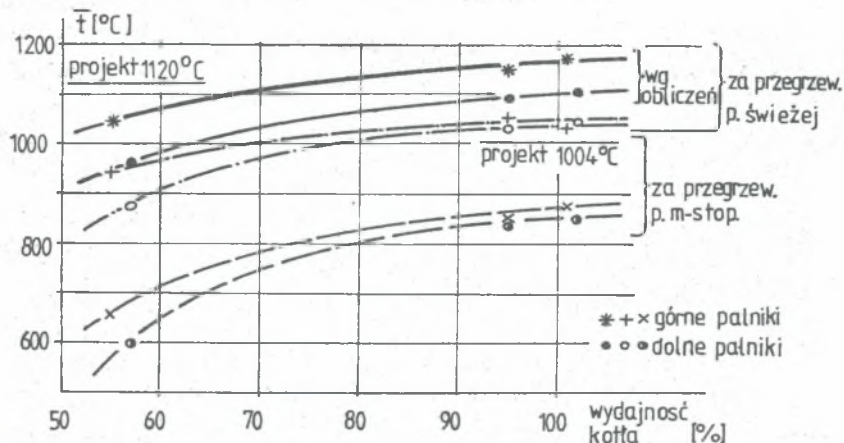
$$\begin{aligned} \bar{w}_1 &= 1,1 \bar{w}_A & / \bar{w}_A - \text{za przegrzewaczem pary świeżej}, \\ \bar{w}_2 &= \bar{w}_B & / \bar{w}_B - \text{za przegrzewaczem pary międzystopniowej}, \\ \bar{w}_3 &= \bar{w}_A \end{aligned}$$

Podobnie obliczono średnie zawartości CO_2 w rozpatrywanych przekrojach. Najważniejsze, średnie wielkości podano w tabeli 2.

Tabela 2

Pomiar nr		1	2	3	4	5	6
Za II st. przegrzewacza pary świeżej	$\bar{w}_A, \text{m/s}$	3,5	5,3	5,8	3,8	6,0	6,0
	$\bar{t}_A, ^\circ\text{C}$	874	1030	1042	941	1054	1032
	$[\text{CO}_2]_A, \%$	15,3	17,1	17,4	14,6	16,5	17,7
	$\bar{\lambda}_A$	1,22	1,10	1,07	1,28	1,13	1,06
Za II st. przegrzewacza pary międzystopniowej	$\bar{w}_B, \text{m/s}$	3,6	5,2	5,7	3,8	5,8	5,9
	$\bar{t}_B, ^\circ\text{C}$	598	836	848	657	851	880
	$[\text{CO}_2]_B, \%$	14,3	16,4	16,6	14,1	15,9	16,7
	$\bar{\lambda}_B$	1,30	1,15	1,12	1,32	1,17	1,12

Wówczas przebieg temperatur spalin w zależności od wydajności kotła kształtuje się tak, jak to pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Zależność zmierzonych temperatur spalin od wydajności kotła
Fig. 5. The measured flue gas temperature Vs boiler loading

Jak to zaznaczono, osiągnięte temperatury były znacznie niższe od projektowanych, z tym że pomiar wzdłuż jednej osi /na jednej wysokości/ za przegrzewaczem pary międzystopniowej nie można uznać za wystarczający dla dokonywania porównań, tym bardziej, że otwór położony jest w dolnej części przekroju /ok. 1/3 wysokości/ - rys. 1. W dodatku należy liczyć się z tym, że w rzeczywistości punkty pomiarowe leżały jeszcze niżej na skutek ugięcia się lancy termopary, znacznie obciążonej wodą chłodzącą. Uwagi te odnoszą się również do pomiarów CO_2 .

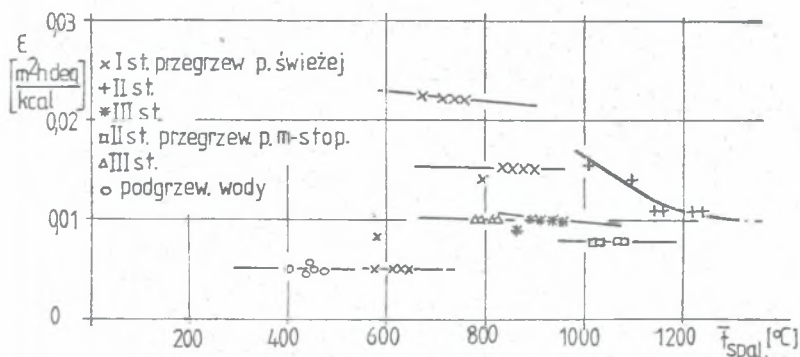
Obserwując zmiany CO_2 zauważyć można, że przy pracy dolnych palników jego zawartość jest większa w obu przekrojach, z wyjątkiem 100% - wydajności kotła, a w każdym przypadku większej temperaturze odpowiada wyższy nadmiar powietrza.

5. Wyniki obliczeń

Wyniki pomiarów porównano z wynikami obliczeń temperatury spalin za rozpatrywanymi powierzchniami ogrzewalnymi. Obliczenia przeprowadzono na EMC przy użyciu programu ZBKE aktualnie wykorzystywanego w CBKK w pracach projektowych. Jako dane wykorzystano zmierzone wielkości podczas pomiarów temperatur spalin oraz oszacowane na podstawie poprzednich badań kotła nr 1, który był lepiej wyposażony w węzły pomiarowe. Dotyczy to zwłaszcza wszystkich strumieni wody schładzającej i strumienia pary międzystopniowej [4, 5]. Wartości temperatur pary, jej ciśnienia, temperatury spalin i liczby nadmiaru powietrza przed lub za poszczególnymi powierzchniami bilansowanymi cieplnie wyznaczono poprzez

interpolację proporcjonalnie do wielkości powierzchni wykorzystując wartości zmierzone na krańcach całego ich ciągu lub poszczególnych stopni.

Jedną z zasadniczych wielkości mających wpływ na wynik obliczeń jest współczynnik zanieczyszczenia powierzchni. W większości przypadków wartości tego współczynnika przyjęto wg normatywów radzieckich i danych zawartych w opracowaniu ITC [6] - por. rys. 6.



Rys. 6. Przyjęte do obliczeń współczynniki zanieczyszczeń

Fig. 6. Fouling coefficients taken for calculations

Dla niektórych powierzchni przyjęto większe wartości celem uzyskania zgodności wyników obliczeń z wynikami pomiarów. Nie dotyczyło to temperatur spalin, a temperatury pary na wylocie z poszczególnych powierzchni oraz strumieni wody schładzającej.

Wyniki obliczeń temperatury spalin zamieszczono również na rys. 5.

Są to wartości wyższe od zmierzonych o 60 - 100 deg.

W jednym przypadku, przy pracy górnych palników i pełnej wydajności kotła różnica osiąga 143 deg.

Z tabeli 2 wynika ponadto wyraźny wpływ położenia płomienia w komorze paleniskowej na temperaturę spalin i zawartości CO_2 , przy czym różnice temperatur wskazują, że wpływ ten jest wyraźniejszy w obliczeniach /większe różnice przy pracy górnych palników/.

6. Podsumowanie

Pomimo spalania w trakcie pomiarów węgla w niższej jakości w przeważającej liczbie przypadków niż zakładano w projekcie /węgiel graniczny $Q_w^r = 20700 \text{ kJ/kg}$, $W_t^r = 19\%$, $A^r = 15\%$ / obliczenia dały w przybliżeniu tę samą wartość temperatury spalin za II stopniem przegrzewacza pary świeżej /1170 i 1100 °C wobec projektowanej 1120 °C/. Natomiast porównanie wartości obliczonych ze zmierzonymi wykazuje różnice 60 - 100 deg

/140 deg w skrajnym przypadku/. Źródła tych rozbieżności tkwią zarówno w pomiarach jak i obliczeniach, a w szczególności w braku możliwości dokładnego określenia:

- strumień pary międzystopniowej i wody schładzającej za poszczególnymi stopniami,
- ciśnienie pary, liczby nadmiaru powietrza oraz temperatur spalin przed i za poszczególnymi stopniami,
- reprezentatywności pobranych próbek paliwa,
- współczynników zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych.

Doskonalenie metod obliczeniowych wymaga gromadzenia i statystycznej analizy wyników pomiarów. Jak zaznaczono w opracowaniu ITC [6] szczególnie współczynniki zanieczyszczeń wykazują małą dokładność i są źródłem rozbieżności w cieplnym bilansowaniu powierzchni ogrzewalnych. Dla ich uściślenia służyć mogą i powinny również pomiary siatkowe temperatury.

O ile na przykładzie tej pracy widać, że technika pomiaru przy użyciu termopar aspiracyjnych, aczkolwiek pracochłonna, lecz aktualnie jedynie dostępna w kraju, zdaje egzamin, to warto podjąć pomiary rozkładu temperatur u wylotu z komory paleniskowej, tym bardziej, że dysponuje się odpowiednią aparaturą.

LITERATURA

- [1] Fontanille D., Buzina M. i inni: Measurements and their analysis on the 600 MW bituminous coal fired once - through boiler EMILE HUCHEF 6. Materiały z konferencji licencjobiorców SULZER, Hartford, 1983.
- [2] Green S.F., Woodham A.U.: Rapid furnace temperature distribution measurement by sonic pyrometry. Materiały konferencyjne CEEB, 1984.
- [3] Matejczyk F.: Pomiary rozkładu temperatur spalin za przegrzewaczami grodziowymi termoparami aspiracyjnymi. Oprac. CBKK, nr 8.798.
- [4] Matczak J., Gołąbek J.: Badania charakterystyk cieplnych przegrzewacza pary kotła OP650-040 w El.Kozienice. Oprac. CBKK nr 6.3501.
- [5] Matczak J., Gołąbek J.: Sprawdzenie dotrzymania założonych parametrów projektowych kotła OP650-040 w El.Kozienice. Oprac. CBKK, nr 3.502.
- [6] Siennicki S., Skiepmo T., Zygałewicz K.: Systematyczne uaktualnianie metod obliczeń cieplnych kotłów w oparciu o wyniki badań eksploatacyjnych. Oprac. ITC, nr 3395 PP.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ
В ЗОНЕ ШИРИВЫХ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ КОТЛА ОП 650

Р е з ю м е

В реферате обсуждается способ измерения распределения температур топочных газов после II ступени перегревателя острого пара и III ступени перегревателя промежуточного пара на ширине котла ОП 650 в ЭС Козенице, с помощью аспирационных термоэлементов охлаждаемых водой. Измерения произведено при производительностях котла порядка 55, 95 и 100% при работе так трёх нижних как и трёх верхних рядов горелок.

Рассчитано среднее значения при использовании скорости топочных газов в качестве весового агента.

Одновременно определено содержания CO_2 в топочных газах, которых среднее значения рассчитано подобным образом.

Результаты сопоставлено с номинальными значениями и с результатами расчёта для измеренных параметров работы котла и сжиганного в данном моменте топлива, принимая коэффициенты загрязнения поверхностей согласно советским стандартом и разработкам ИТЦ.

Создавшиеся расхождения порядка 60-100 градусов вызываемые прежде всего трудностями в оценке коэффициента загрязнения отдельных поверхностей нагрева, оценки струй промежуточного пара и охлаждающей воды, распределения давлений пара и распределения коэффициента избытка воздуха.

FLUE GAS TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE RADIANT
SUPERHEATERS ZONE OF BOILER OP 650

S u m m a r y

In this paper the method of the flue gas temperature distribution measurement after the second stage of primary steam superheater and the second stage of reheat steam superheater along the width of op 650-040 boiler in Kozienice Power Station is described. The measurements were taken by means of sucking pyrometers at boiler loadings of 55,95 and 100 percent at both upper and lower rows of operating burners. The average values have been calculated using flue gas velocity as a weighting coefficient. The CO_2 contents was measured simultaneously. Their average values have been calculated in similar way. The results are compared to planned values and to results of calculations at measured boiler's operational parameters and fired fuel at the time. The fouling coefficients according to soviet standards and ITD's reports have been taken into calculations. Resulting differences have an order of 60-100 centigrades and are caused mainly by difficulties in exact estimation of mentioned fouling coefficients for heating surfaces, and estimation of reheat steam and desuperheating water flow rates and distribution of excess air.

Recenzent: Prof. mgr inż. Piotr Orłowski
Wpłynęło do Redakcji w marcu 1986 r.