

Julian GAIŃSKI

Marek PRONOBIS

Institut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechnika Śląska

BADANIA WPŁYWU SYPKICH OSADÓW POPIOŁU NA OPORY PRZEPŁYWU W PĘCZKACH KONWEKCYJNYCH KOTŁÓW

Streszczenie. Określono wpływ powstania osadów popiołu na powierzchniach konwekcyjnych kotłów na opory przepływu spalin. Odpowiednie badania przeprowadzono zarówno na kotle OP 650 Elektrowni Rybnik, jak i na modelach w skali laboratoryjnej. Uzyskane wyniki dotyczą zanieczyszczeń sypkich występujących powyżej temperatury rosy spalin.

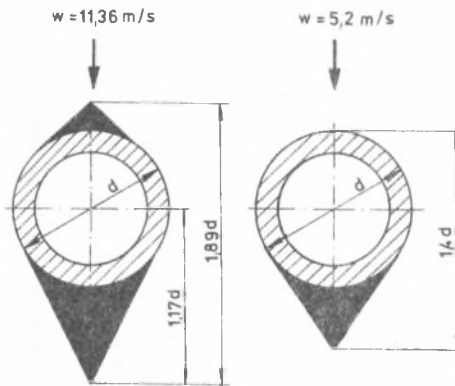
1. WSTĘP

Prawidłowe obliczenie spadku ciśnienia spalin na pęczkach konwekcyjnej części kotła ma zasadnicze znaczenie dla właściwego doboru wentylatorów ciągu. Problem ten jest również ważny w zagadnieniach optymalizacyjnych, gdzie istotne jest dokładne wyznaczenie zużycia energii na przetłaczanie spalin przez pęczek.

W krajowych kotłach spalane są paliwa o wysokiej zawartości popiołu, co prowadzi do powstania na powierzchniach konwekcyjnych zanieczyszczeń zmieniających istotnie kształt przekroju poprzecznego rur - rys. 1.

Zmiana kształtu rur może mieć znaczący wpływ na liczbę oporu wymiennika, a tym samym na spadek ciśnienia spalin przepływających przez pęczek.

Zagadnienie to nie zostało dotąd rozwiązane. Istniejące dane są jedynie fragmentaryczne i często sprzeczne. W pracy [1], w której badano układy rur opłętowanych, stwierdzono spadek liczby oporu w miarę narastania osadów o ok. 17% w przypadku prędkości omywania $w=14$ m/s. Gdy prędkość omywania spadła do 7 m/s, liczba oporu pęczka zanieczyszczonego wzrosła i przekroczyła wartość dla pęczka czystego o 25%. Osad popiołu podczas badań miał charakter sypki. Zanieczyszczenia tego rodzaju w stosunkowo szybkim czasie, nie przekraczającym kilku godzin, stabilizują swój kształt i rozmiary, osadzając się przy tym wyłącznie na napływowej i spływowej powierzchni rur. Nie ulega więc zmianie prędkość spalin w największym przekroju pęczka.



Rys. 1. Przekroje rur pokrytych osadem sypkiego popiołu

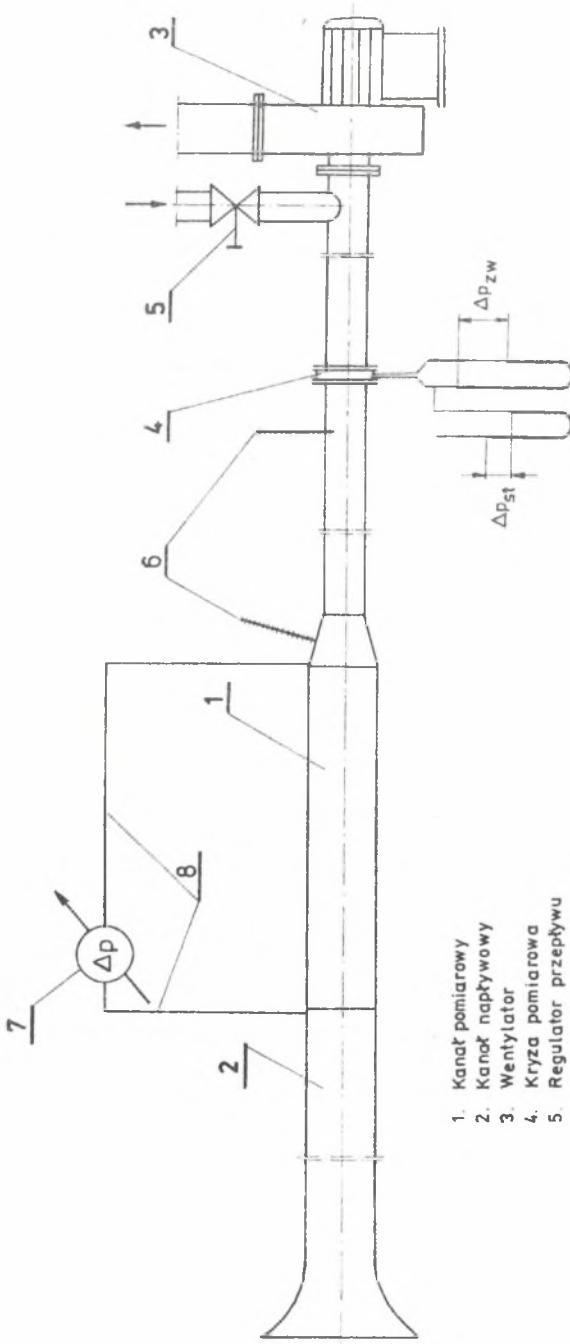
Fig. 1. Cuttings of the tubes covered by grindings ashes

owych kotłów zagadnienie wpływu osadów popiołu na liczbę oporu kotłowych pęczków konwekcyjnych nie było dotąd badane. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych zarówno na kotle OP 650 Elektrowni Rybnik, jak i w warunkach laboratoryjnych na modelach pęczków pokrytych osadami zanieczyszczeń sypkich występującymi powyżej temperatury rosy spalin.

2. BADANIA MODELOWE

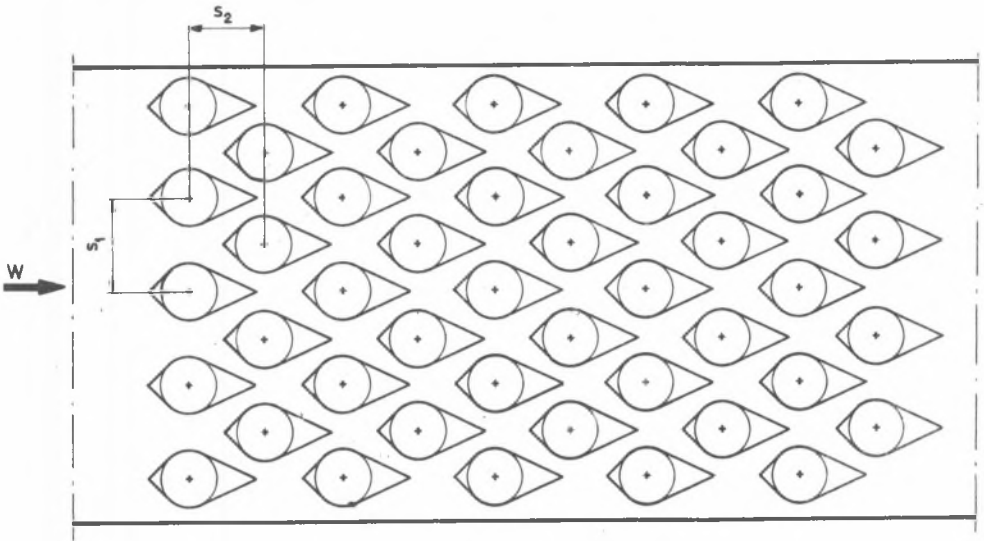
Badania modelowe przeprowadzono na instalacji przedstawionej schematycznie na rys. 2. Stanowisko składało się z prostokątnego kanału napływowego zaopatrzonego w dyszę na wlocie, kanału pomiarowego zawierającego badany pęczek - rys. 3 i przewodu rurowego o średnicy 100 mm. Zawór regulacyjny umożliwiał sterowanie natężeniem przepływu powietrza. Do pomiaru strumienia powietrza służyła kryza ISA z pomiarem przytarczowym wykonana wg PN-65/M 53950. Ciśnienie różnicowe na zwężce oraz ciśnienie przed zwężką mierzono manometrami typu "Askania". Temperaturę powietrza przed kryzą i w obrębie kanału pomiarowego określano za pomocą termometrów rtęciowych. Ciśnienie barometryczne mierzono barometrem rtęciowym, zaś wilgotność powietrza higrometrem włosowym. Stanowisko umieszczone było na ssaniu wentylatora o wydajności $0,83 \text{ m}^3/\text{s}$ i sprężu 2900 Pa.

Inaczej przedstawia się sytuacja w przypadku osadów niskotemperaturowych, tzn. występujących poniżej temperatury punktu rosy spalin. Mają one tendencję do znacznego wzrostu przewodzącego do zmniejszenia prześwitów między rurami. W pracy 2 podano przykład pęczka podgrzewacza powietrza z rur szklanych, którego opory po zanieczyszczeniu wzrastały 4-6 razy przy temperaturze powietrza na wlocie ok. 50°C oraz 2 razy przy podwyższeniu wlotowej temperatury powietrza do 70°C . W pierwszym przypadku temperatura spalin wylotowych wynosiła $125-150^\circ\text{C}$, zaś w drugim $140-160^\circ\text{C}$. Dla kra-



1. Kanał pomiarowy
2. Kanał napływowy
3. Wentylator
4. Kryza pomiarowa
5. Regulator przepływu
6. Termometry
7. Mikromanometr „Askania”
8. Przewody impulsowe.

Rys. 2. Schemat instalacji pomiarowej
 Fig. 2. Scheme of measurement equipment



Rys. 3. Schemat kanału pomiarowego z pęczkiem rur zanieczyszczonych
 Fig. 3. Scheme of measurement channel with polluted bundle of tubes

Liczbę oporu wyznaczano z zależności:

$$\xi = 2 \frac{\Delta p}{\rho_w w^2} \quad (1)$$

gdzie:

Δp - spadek ciśnienia powietrza omywającego pęczek, mierzony manometrem "Askania", Pa,

ρ - gęstość powietrza dla średniej temperatury w obrębie pęczka, kg/m^3 ,

w - prędkość powietrza w najwęższym przekroju pęczka, m/s.

Badano układy przestawne i korytarzowe kształtek o przekroju wg rys. 1A odpowiadającym typowemu przekrojowi rury pokrytej osadem sypkim. Osady tego rodzaju występują najczęściej w strefie średnotemperaturowej kotła, tzn. od ok. 800°C do temperatury rosy spalin t_r . W tym obszarze kotła umieszczone są na ogół duże pęczki rurowe o małych podziałkach, których opory determinują spadek ciśnienia spalin w całym kotle

Elementy pomiarowe wykonywano z gipsu metodą odlewania. Badania prowadzono metodą porównawczą: najpierw badano pęczek zbudowany z elementów cylindrycznych o średnicy 38 mm modelujący układ niezanieczyszczony, a następnie pęczek o identycznym układzie i podziałkach zbudowany z kształtek o przekroju rys. 1A opartym na okręgu o średnicy również 38 mm.

Zbadano następujące przypadki:

a) układ korytarzowy

$$s_1/d=1,5 \quad s_2/d=2,026$$

$$s_1/d=1,5 \quad s_2/d=3$$

$$s_1/d=2,132 \quad s_2/d=2,026$$

$$s_2/d=2,132 \quad s_2/d=3$$

b) układ przestawny

$$s_1/d=2,132 \quad s_2/d=2,026$$

$$s_1/d=1,5 \quad s_2/d=3$$

$$s_1/d=1,5 \quad s_2/d=2,026$$

$$s_1/d=2,132 \quad s_2/d=3$$

Wyniki badań zestawiono w tablicy 1 i na rys. 4-7.

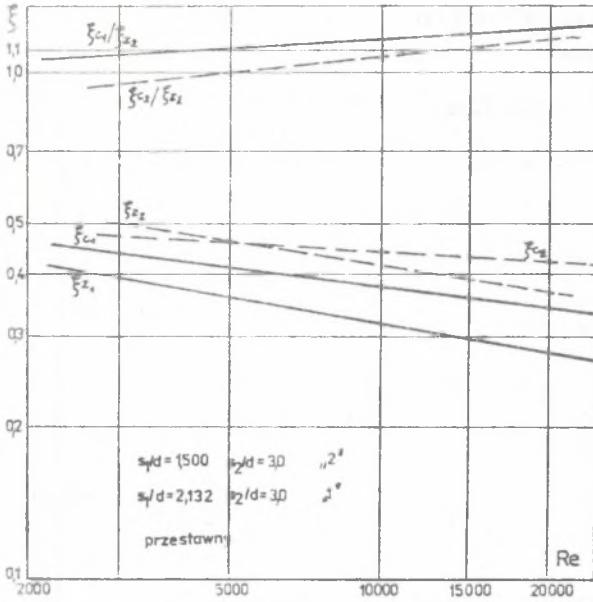
Tablica 1

Wartość stałych korelacji opisujących liczbę oporu

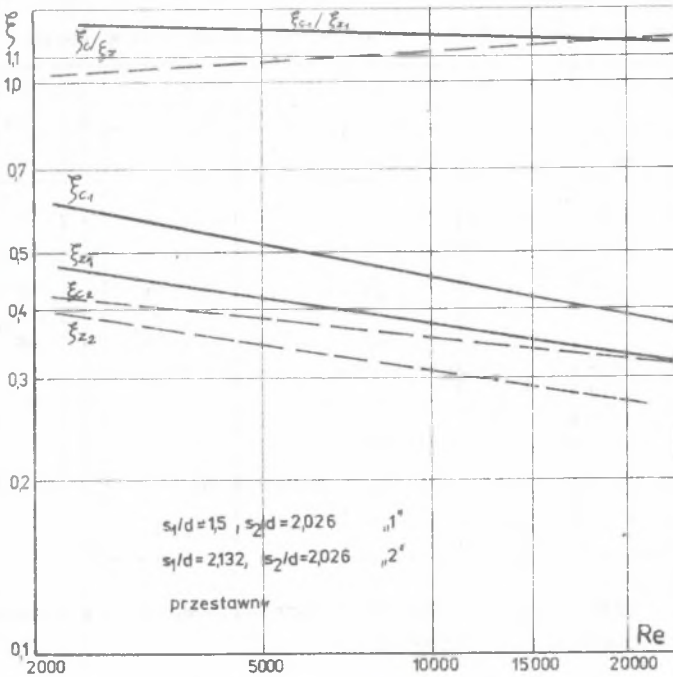
	Podziałki		Pęczek czysty		Pęczek zanieczyszczony		Porównanie $\frac{A_c}{A_z} \text{Re}^{(m_c - m_z)}$
	s_1/d	s_2/d	A_c	m_c	A_z	m_z	
Korytarzowy	1,5	2,02	0,9114	-0,099	2,07	-0,185	0,44 $\text{Re}^{0,086}$
	1,5	3	2,81	-0,191	2,72	-0,2	1,03 $\text{Re}^{0,009}$
	2,13	2,02	0,1663	0,044	0,051	0,154	3,26 $\text{Re}^{-0,11}$
	2,13	3	1,023	-0,123	0,1842	0,0468	5,55 $\text{Re}^{-0,17}$
Przestawny	1,5	2,02	2,73	-0,195	1,6	-0,157	1,71 $\text{Re}^{-0,038}$
	1,5	3	0,732	-0,054	1,79	-0,158	0,41 $\text{Re}^{0,104}$
	2,13	2,02	0,955	-0,107	1,42	-0,165	0,673 $\text{Re}^{0,058}$
	2,13	3	1,154	-0,122	1,71	-0,182	0,675 $\text{Re}^{0,06}$

Następnie metodą regresji wyznaczono korelacje opisujące zmienność liczby oporu w funkcji liczby Reynoldsa:

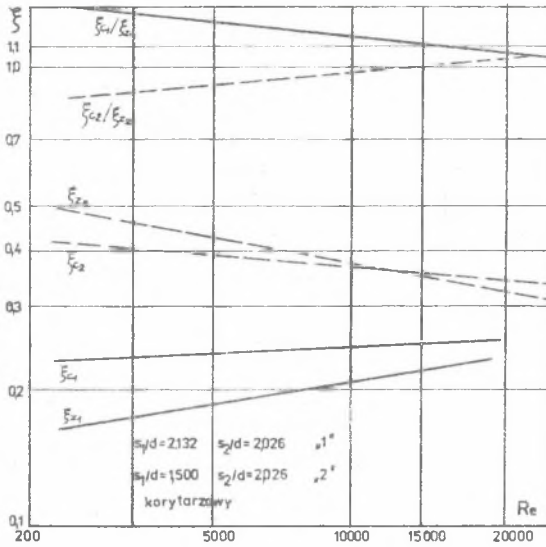
$$\xi = A \text{Re}^m$$



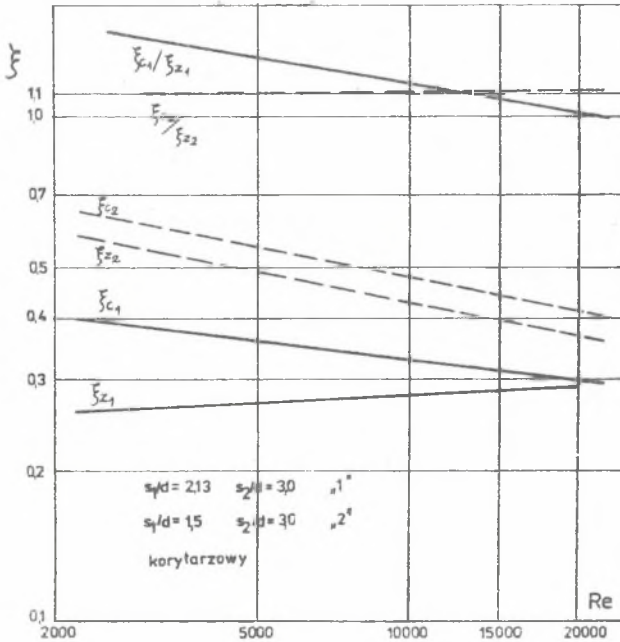
Rys. 4. Porównanie liczb oporu dla pęczków czystych i zanieczyszczonych
 Fig. 4. Comparison of resistance number for clean and polluted bundles



Rys. 5. Porównanie liczb oporu dla pęczków czystych i zanieczyszczonych
 Fig. 5. Comparison of resistance number for clean and polluted bundles



Rys. 6. Porównanie liczb oporu dla pęczków czystych i zanieczyszczonych
 Fig. 6. Comparison of resistance number for clean and polluted bundles



Rys. 7. Porównanie liczb oporu dla pęczków czystych i zanieczyszczonych
 Fig. 7. Comparison of resistance number for clean and polluted bundles

Wartości stałych A i m dla stanu czystego i zanieczyszczonego przedstawiono w tabelicy 1. W celu porównania liczb oporu w pęczku czystym i zanieczyszczonym wyznaczono stosunki:

$$\xi_c / \xi_z = \frac{A_c}{A_z} \text{Re}^{(m_c - m_z)}$$

również zamieszczone w tabelicy 1.

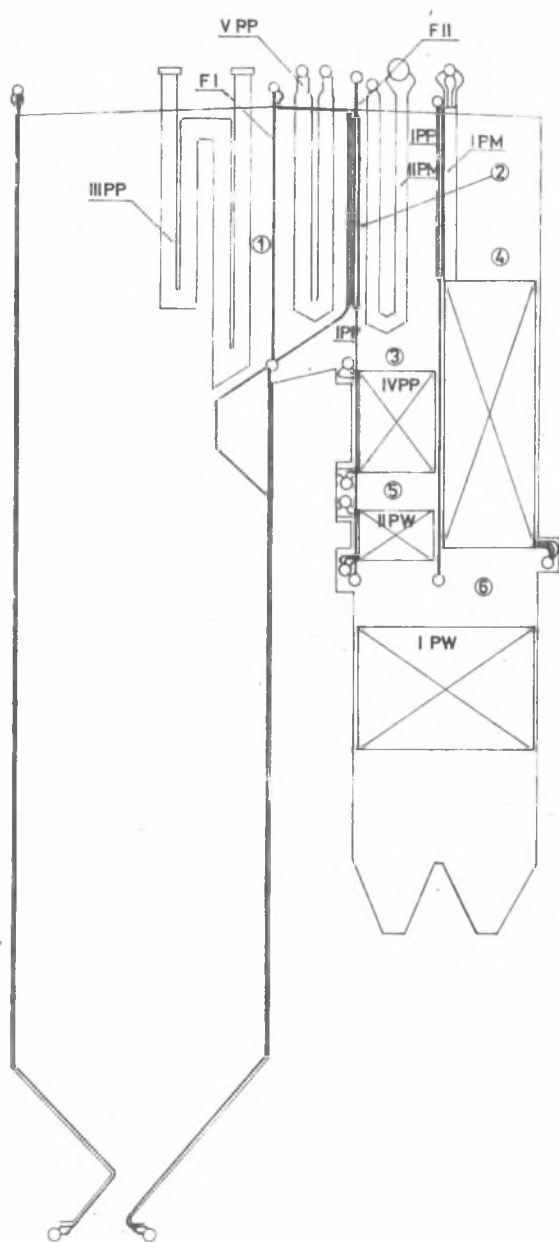
Przebieg zmienności korelacji $\xi_c = f(\text{Re})$, $\xi_z = f(\text{Re})$ i $\xi_c / \xi_z = f(\text{Re})$ przedstawiono na rys. 4-7. Z uzyskanych wyników wyciągnąć można wnioski, że powstanie osadów na powierzchniach konwekcyjnych, powodując zmianę przekroju omywanego rur, prowadzi do pewnego obniżenia liczby oporu pęczka, sięgającego 10-20%.

3. BADANIA NA OBIEKTCIE RZECZYWISTYM

Celem przeprowadzonych badań przemysłowych było uzyskanie rzeczywistych wartości liczb oporu dla pęczków czystych i pokrytych osadem popiołu lotnego. Pomiarów wykonano w drugim ciągu kotła OP 650 elektrowni Rybnik. Ze względu na warunki dostępu do pęczków konwekcyjnych i wymagania związane z przeprowadzeniem pomiarów jako obiekt badany wybrano pęczek IV stopnia przegrzewacza pary - rys. 8.

Przekrój kanału spalinowego w obrębie mierzonego pęczka wynosi 19 200 x 3060 mm. Pęczek składa się z 48 rzędów rur o średnicy 32 mm w układzie przestawnym o podziałkach 120 i 50 mm. Pomiarów wykonano w stanie zimnym kotła przy maksymalnym obciążeniu wentylatorów ciągu i przy ok. 80% tego obciążenia. Najpierw przeprowadzono pomiary dla czystego pęczka bezpośrednio po remoncie kotła, a następnie po pewnym czasie eksploatacji dla wymiennika pokrytego sypkim osadem popiołowym. Siatka punktów pomiarowych umożliwiła wyznaczenie rozkładu prędkości przepływu powietrza na dopływie i wypływie z pęczka. W celu porównania wyników badań modelowych i na rzeczywistym kotle przeprowadzono badania modelowe także dla pęczka o podziałkach względnych, identycznych jak w badanym przegrzewaczu. Z pomiarów na kotle uzyskano następujące wyniki:

Prędkość powietrza	Liczba Reynoldsa	Liczba oporu	Stan pęczka
2,5 m/s	5400	0,12	czysty
3,2 m/s	6800	0,13	czysty
2,55 m/s	5500	0,11	zanieczyszcz.
3,2 m/s	6800	0,08	zanieczyszcz.



Rys. 8. Schemat kotła OP 650 Elektrowni Rybnik

Fig. 8. Scheme of the boiler OP 650 in the Electric power plant Rybnik

Odpowiednie wyniki uzyskane z badań modelowych:

Liczba Reynoldsa	Liczba oporu	Stan pęczka
5450	0,15	czysty
6800	0,149	czysty
5450	0,135	zanieczyszczony
6800	0,13	zanieczyszczony

Porównując uzyskane wyniki, stwierdzić można, że zarówno w czasie badań w kotle, jak i na modelu zauważa się spadek liczby oporu po powstaniu osadów popiołu. Kształt przekroju poprzecznego rur pęczka w stanie zanieczyszczonym jest bardziej opływowy, co w pewnym stopniu oddziałuje zarówno na opory przepływu, jak i na współczynnik wnikania ciepła drogą konwekcji [3]. W badaniach wymiany ciepła stwierdzono, że współczynnik wnikania maleje o ok. 12% po uzyskaniu przez przekrój rury kształtu jak na rys. 1.

4. WNIOSKI

- Zarówno z badań modelowych, jak i z przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym wynika wniosek, że powstanie sypkich osadów na powierzchniach kotłowych pęczków konwekcyjnych omywanych poprzecznie prowadzi do pewnego zmniejszenia liczby oporu spalin.
- Powwyższy spadek liczby oporu dla zakresu liczb Re spalin spotykanego w technice kotłowej jest niewielki i nie wymaga uwzględnienia w obliczeniach aerodynamicznych kotła.

LITERATURA

- [1] SHARAN N.H.: Wärmeübergang und Druckverlust des Rauchgases bei querangeströmten Flossenrohren. Sulzer - Forschungsheft 1966.
- [2] GAVRILOV A.F., MALKIN B.M.: Zagriaznienije i oczistka powierzchnostiej nagriewa kotelnyh ustanowok. Energia, Moskwa 1960.
- [3] PRONOBIS M.: Einfluss der Verschmutzung auf den Wärmeaustausch in konvektiven Kesselrohrbündeln. VGB Kraftwerkstechnik, 66 H. 2.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Wiśniewski

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СЫПУЧИХ ОСАДКОВ ПЕПЕЛА НА ГАЗОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ
В ТРУБНЫХ ПУЧКАХ КОТЛОВ

Р е з ю м е

В статье определено влияние возникновения осадков пепела на конвекционных поверхностях котлов на газовое сопротивление продуктов сгорания. Соответствующие исследования проведены на котле типа ОР 650 в ЭС Рыбник и на моделях в лабораторном масштабе. Полученные результаты относятся к сыпучим загрязнениям возникающим выше температуры точки росы.

INVESTIGATION OF GRINDING ASHE EFFECT ON THE FLOW RESISTANCE
IN THE CONVECTION BOILER BUNDLES

S u m m a r y

An effect of grinding ashes on the surfaces of convection boilers upon the flow resistance is found. The investigations have been performed using the boiler OP 650 in the Electric Power station Rybnik as well as models made in the laboratories. Results dealing with pollution existing above the temperature of combustion gas are obtained.