

Marek PRONOBIS

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych  
Politechnika Śląska

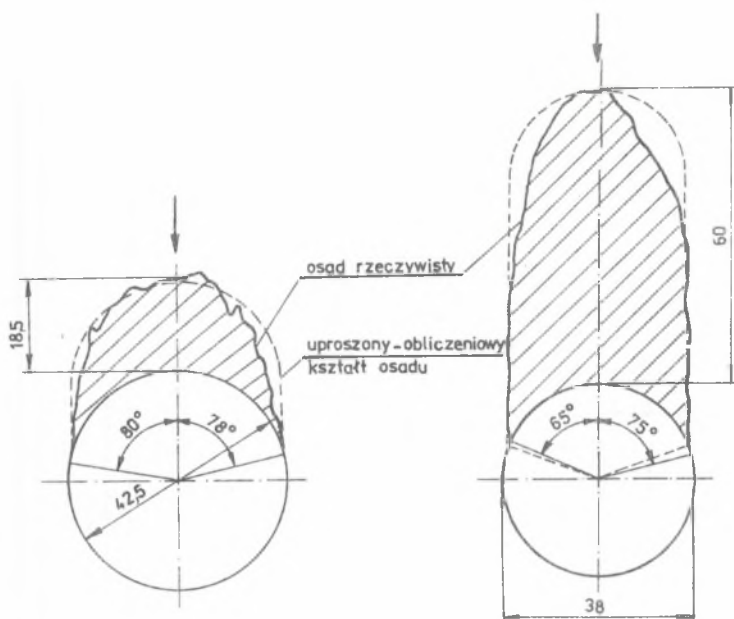
## KONWEKCYJNE I RADIACYJNE WSPÓŁCZYNNIKI WNIKANIA CIEPŁA OD SPALIN DO ZANIECZYSZCZONYCH RUR KOTŁOWYCH

**Streszczenie.** Osady popiołu na powierzchniach kotłowych pęczków konwekcyjnych powodują zmianę przekroju poprzecznego rur, co pociąga za sobą zmianę konwekcyjnych i radiacyjnych współczynników wnikania ciepła. W pracy przedstawiono wyniki badań modelowych wnikania ciepła drogą konwekcji oraz obliczenia grubości promieniującej warstwy spalin dla pęczków pokrytych najczęściej spotykanymi rodzajami osadów.

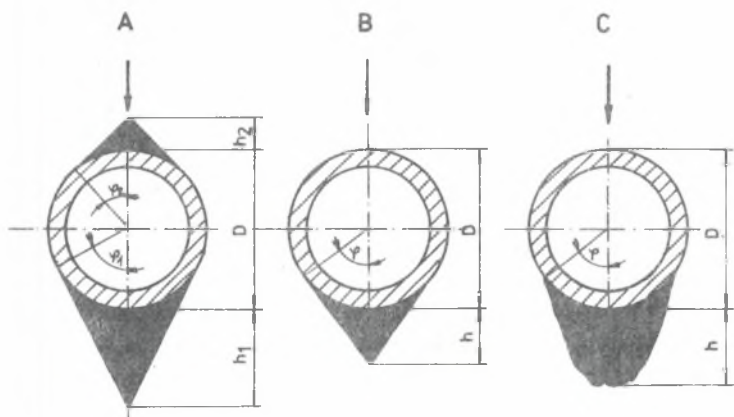
### 1. WSTĘP

Powstanie osadów popiołu na powierzchniach rur powoduje zmianę przekroju poprzecznego elementów przejmujących ciepło. Zestalone osady wysokotemperaturowe występujące powyżej 800°C mają na ogół kształt płetw tworzących się od strony napływu - rys. 1 (osad jednostronny równoległy). W temperaturach niższych osady mają charakter sypki o kształtach jak na rys. 2 (osady jednostronne i dwustronne styczne). Przy znacznym wzroście rozmiarów zanieczyszczeń osady tego rodzaju łączą się dając w wyniku mostki popiołowe - rys. 3.

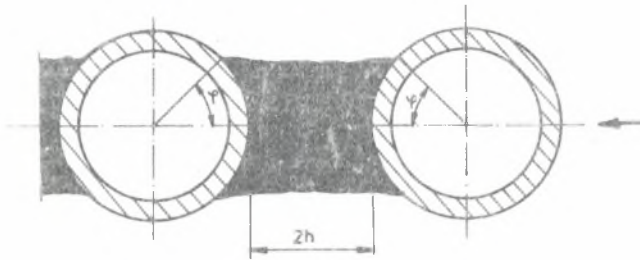
Zmiana kształtu przekroju rur pociąga za sobą zmiany lokalnych i średnich wartości zarówno konwekcyjnej, jak i radiacyjnej składowej współczynnika wnikania ciepła od spalin. W pracy [1] stwierdzono, że zastąpienie rzeczywistego rozkładu współczynnika wnikania wartością średnią ma jedynie nieznaczny wpływ na wyniki obliczeń cieplnych. Podobny wniosek wynika z obliczeń dla układów membranowych [2], których kształt odpowiada rurom połączonym mostkami popiołu. Do praktycznych obliczeń wystarcza więc znajomość średnich wartości współczynników  $\alpha_{1k}$  i  $\alpha_{1r}$ , których wyznaczeniu poświęcona jest niniejsza praca.



Rys. 1. Przekroje typowych osadów wysokotemperaturowych  
 Fig. 1. Cuttings of the typical high temperature gridings



Rys. 2. Przekroje osadów sypkich  
 Fig. 2. Cuttings of ashes griding



Rys. 3. Mostki popiołowe

Fig. 3. Ashes bridges

## 2. WPŁYW KSZTAŁTU OSADU NA KONWEKCYJNY WSPÓŁCZYNNIK WNIKANIA CIEPŁA

Powstanie osadów na powierzchniach rur pociąga za sobą zmianę warunków omywania pęczka przez spaliny. Konsekwencją tego jest zmiana konwekcyjnego współczynnika wnikania ciepła od spalin do rury.

Dla ilościowej oceny tego zjawiska konieczne było przeprowadzenie badań doświadczalnych. Posłużono się metodą opartą na analogii między konwekcyjnym wnikaniem ciepła i wymianą masy podczas sublimacji naftalenu  $C_{10}H_8$  w strumieniu powietrza. Szczegółowy opis sposobu pomiaru podano w pracach [3, 4].

W celu określenia wpływu zanieczyszczeń na konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła wyznaczono wartości liczby Sherwooda w pęczkach zbudowanych z elementów o przekroju typowym dla rur pokrytych różnego rodzaju osadami popiołu. Porównywano przy tym intensywność wymiany masy dla modelu pęczka zanieczyszczonego oraz dla wymiennika zbudowanego z rur okrągłych o tym samym układzie i podziałkach względnych.

Założenie, że stosunki liczb Sherwooda dla obu modeli są identyczne ze stosunkami odpowiednich liczb Nusselta, odpowiada przyjęciu niezmienności współczynnika analogii  $\chi$  dla obu przypadków:

$$\chi_c = Nu_c / Sh_c = Nu_z / Sh_z = \chi_z \quad (1)$$

W pracy [5] stwierdzono, że prawdopodobieństwo popełnienia błędu przy takim założeniu mieści się w granicach 2-5% dla korytarzowych i przestawnych pęczków z rur gładkich, pęczków membranowych, a nawet dla odcinka rozbiegowego rury. W związku z tym można przyjąć, że zmiana kształtu przekroju na skutek zanieczyszczenia nie wpływa istotnie na wartość  $\chi$ , a tym samym można napisać:

$$Sh_z / Sh_c = Nu_z / Nu_c \quad (2)$$

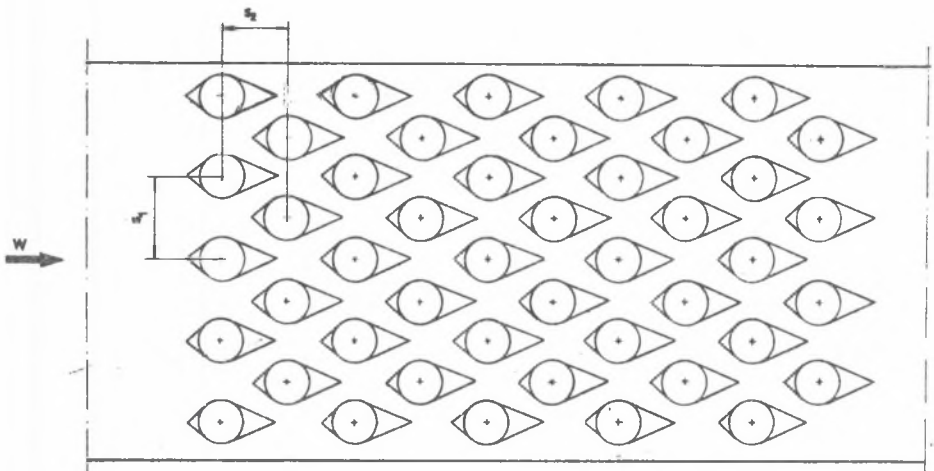
Posługując się stosunkami liczb Sherwooda unika się błędowi wyznaczenia funkcji analogii  $\chi$  wynikającego z niedokładności wyznaczenia współczynnika dyfuzji naftalenu w powietrzu i niedokładności określenia liczby Schmidta (w literaturze utrzymują się na ten temat dość znaczne rozbieżności [6]).

Pomiary przeprowadzono dla następujących układów rur:

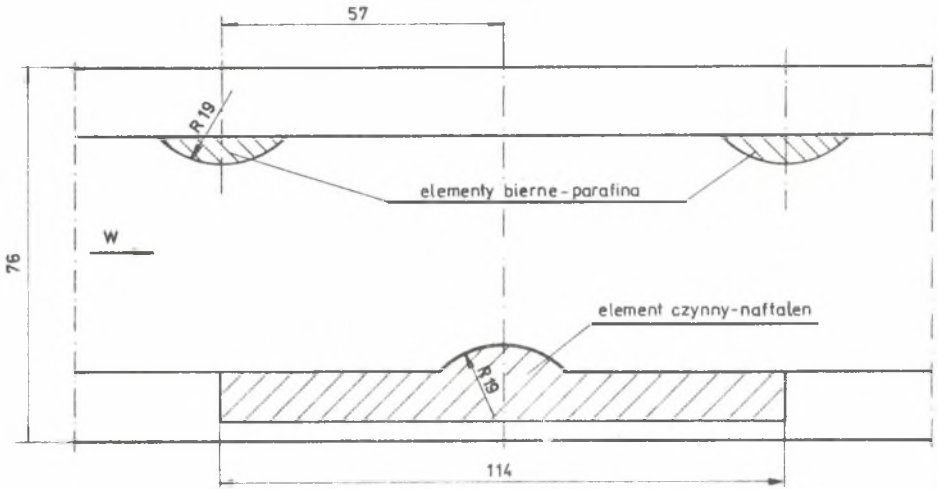
- a) układ przestawny,  $\sigma_1 = \sigma_2 = 2$  - rury czyste,
- b) układ przestawny,  $\sigma_1 = 1,7$   $\sigma_2 = 1,4$  - rury czyste,
- c) pęczek "a" rury zanieczyszczone wg rys. 2A,
- d) pęczek "b" rury zanieczyszczone wg rys. 2A,
- e) pęczek przestawny,  $\sigma_1 = 2$   $\sigma_2 = 1,5$  - rury z mostkami popiołowymi wg rys. 3,
- f) układ korytarzowy,  $\sigma_1 = 2$   $\sigma_2 = 3$  - rury czyste,
- g) pęczek "f" rury zanieczyszczone wg rys. 2A,
- h) pęczek "f" rury z mostkami popiołowymi wg rys. 3.

Schematy badanych pęczków przedstawiono na rys. 4 i 5, zaś wyniki pomiarów na rys. 6 i 7. Liniowy rozkład punktów na wykresie  $\lg Sh - \lg Re$  wskazuje, że intensywność wnikanía masy można opisać zależnością:

$$Sh = C Re^m \quad (3)$$

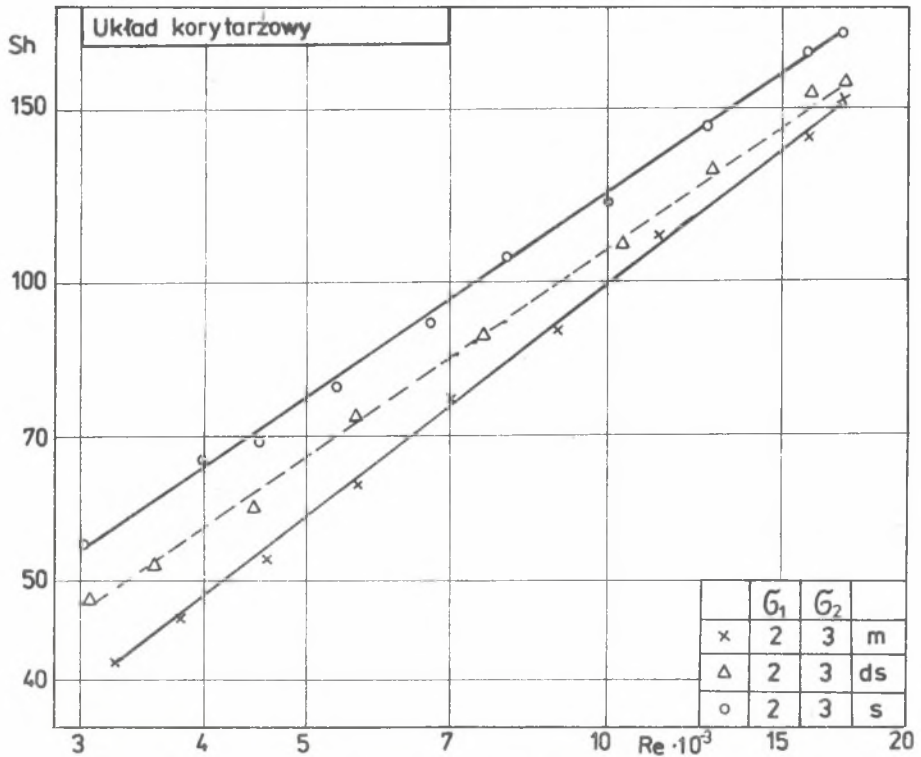


Rys. 4. Schemat modelu pęczka pokrytego osadami syrkimi  
 Fig. 4. Scheme of bundle model covered by ashes gridding



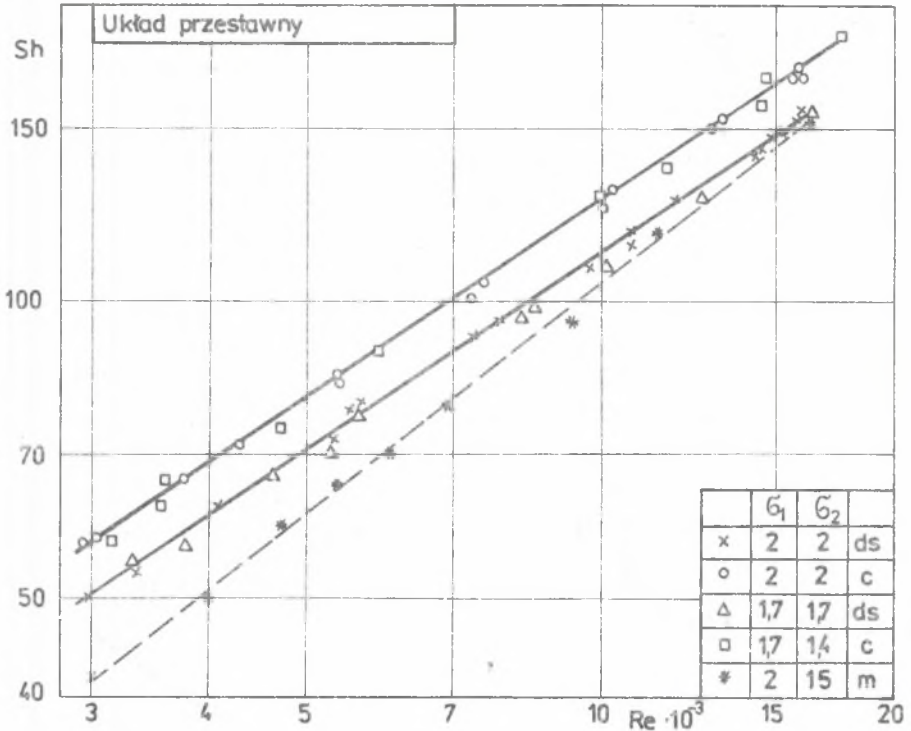
Rys. 5. Schemat modelu pęczka pokrytego osadami w kształcie mostków popiołowych

Fig. 5. Scheme of bundle model covered by ashes bridges



Rys. 6. Zależność  $Sh = f Re$  dla układów korytarzowych

Fig. 6. Relation  $Sh = f (Re)$  for corridor systems



Rys. 7. Zależność  $Sh = f Re$  dla układów przestawnych  
 Fig. 7. Relation  $Sh = f (Re)$  for relay systems

Przy opracowywaniu wyników pomiarów pominięto wpływ zmienności liczby Schmidta ze względu na niewielki zakres zmian temperatur powietrza podczas pomiarów w granicach 20-25°C.

Metodą regresji wyznaczono wartości  $C$  i  $m$ , przy czym współczynniki korelacji we wszystkich przypadkach przekraczały 0,93 dla kilkunastu stopni swobody. Współczynniki regresji dla pęczków przestawnych zestawiono w tabelicy 1, zaś dla korytarzowych w tabl. 2.

Porównując wyniki dla stanu zanieczyszczonego i czystego uzyskano - dla przypadków  $c$  i  $a$

$$Sh_c/Sh_a = Nu_c/Nu_a = 0,826 Re^{0,008} \quad (4)$$

Wpływ liczby Reynoldsa jest niewielki, zaś wartość średnia  $Nu_c/Nu_a$  dla  $Re = 2000 - 15\ 000$  wynosi 0,834.

Tablica 1

Współczynniki równań kryterialnych dla pęczków przestawnych

Stan pęczka	$\sigma_1$	$\sigma_2$	C	m
czysty	2	2	0,288	0,661
osad styczny dwustronny	2	2	0,238	0,669
mostki międzyrurowe	2	1,5	0,084	0,774
czysty	1,7	1,4	0,263	0,671
osad styczny dwustronny	1,7	1,4	0,231	0,669

Tablica 2

Współczynniki równań kryterialnych dla pęczków korytarzowych

Stan pęczka	$\sigma_1$	$\sigma_2$	C	m
czysty	2	3	0,23	0,681
osad styczny dwustronny	2	3	0,174	0,696
mostki międzyrurowe	2	3	0,071	0,787

- dla przypadków d i b

$$Sh_d/Sh_b = Nu_d/Nu_b = 0,881 Re^{-0,002} \quad (5)$$

Wartość średnia w przedziale  $Re = 2000 - 15\ 000$  wynosi 0,874.

- dla przypadków e i a

$$Sh_e/Sh_a = Nu_e/Nu_a = 0,2915 Re^{0,113} \quad (6)$$

- dla przypadków g i f

$$Sh_g/Sh_f = Nu_g/Nu_f = 0,762 Re^{0,017} \quad (7)$$

Wartość średnia w przedziale  $Re = 2000 - 15\ 000$  wynosi  $0,882$ .

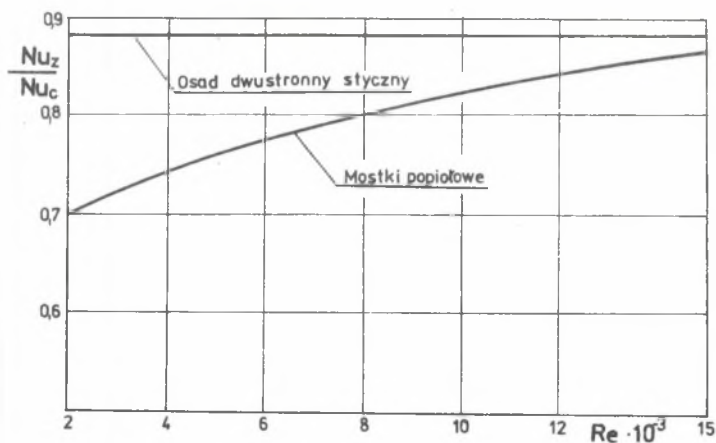
- dla przypadków  $h$  i  $f$

$$Sh_h/Sh_f = Nu_h/Nu_f = 0,309 Re^{0,106} \quad (8)$$

Analizując powyższe zależności, stwierdzić można, że stosunki  $Nu_i/Nu_j$  dla osadów dwustronnych stycznych jedynie w nieznacznym stopniu zależą od liczby Reynoldsa, w związku z czym dla spotykanego w kotłach zakresu  $Re = 2000 - 15\ 000$  można posługiwać się wartością średnią. Biorąc pod uwagę fakt, że dla trzech zbadanych przypadków uzyskano zbliżone wartości, można przyjąć jedną średnią dla osadów stycznych dwustronnych w pęczkach przestawnych i korytarzowych:

$$Nu_{ds}/Nu_c = 0,88 \quad (9)$$

W przypadku mostków popiołowych wpływ liczby  $Re$  jest większy i wymaga uwzględnienia w obliczeniach. Ponieważ różnice między wynikami dla układów przestawnych i korytarzowych leżą poniżej dokładności pomiarów, przyjęto do stosowania w obliczeniach uśrednioną krzywą przedstawioną na rysunku 8.



Rys. 8. Stosunki liczb Nusselta dla stanu zanieczyszczonego i czystego

Fig. 8. Ratios of  $Nu$  numbers for polluted and clean states



Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że powstanie osadów na powierzchni rur kotłowych powoduje zmniejszenie intensywności konwekcyjnej wymiany ciepła. Spowodowane to jest zmianą warunków omywania rur na skutek innego (bardziej opływowego) kształtu przekroju rur zanieczyszczonych. Podobne zjawisko stwierdzono podczas badań poprzecznie omywanych pęczków rur o przekroju owalnym [7].

Dla osadów dwustronnych stycznych zmniejszenie konwekcyjnego współczynnika wnikania ciepła wynosi ok. 12%, natomiast w przypadku mostków popiołowych zmienia się od ok. 30 do 13% w zależności od liczby Re. Osady jednostronne styczne zmieniają profil rury w nieznacznym stopniu, w związku z czym ich wpływ na konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła można pominąć. Podobny wniosek wynika również z [8], gdzie badano pęczek rur o przekroju zbliżonym do przedstawionego na rys. 2B. Osadów jednostronnych równoległych nie badano ze względu na ogromną różnorodność kształtów powierzchni zewnętrznej i niemożliwość precyzyjnego pomiaru powierzchni wnikania. W obliczeniach można przyjąć, że współczynnik wnikania  $\alpha_{1k}$  zmniejsza się w granicach 0-5%, zaś ewentualny błąd nie ma w tym przypadku istotnego znaczenia ze względu na mniejszy udział konwekcji w wymianie ciepła powyżej temperatury spalin 800°C.

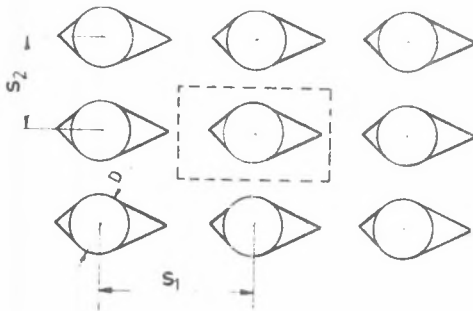
### 3. WPŁYW KSZTAŁTU OSADU NA RADIACYJNY WSPÓŁCZYNNIK WNIKANIA CIEPŁA

Powstanie osadów na powierzchniach konwekcyjnych kotła ma znaczący wpływ na intensywność radiacyjnej wymiany ciepła między spalinami a powierzchnią zanieczyszczonych rur. Zmianie ulega bowiem zarówno stopień czerni ścianki, jak i spalin. O ile wpływ zmian stopnia czerni powierzchni osadów ma małe znaczenie dla radiacyjnej wymiany ciepła, ponieważ ciepło przejmuje głównie powierzchnia rury wolna od osadów, o tyle zmiany emisyjności i absorpcyjności spalin mają zasadnicze znaczenie. Zmianie ulega bowiem grubość promieniującej warstwy spalin (średnia droga promieni) w pęczku, pociągając za sobą zmniejszenie radiacyjnego współczynnika wnikania ciepła w miarę narastania zanieczyszczeń.

Ogólna zależność opisująca średnią drogę promieni ma postać:

$$s = c_g \frac{4V}{H} \quad (10)$$

gdzie  $V$  jest objętością przestrzeni wypełnionej gazem promieniującym na powierzchnię  $H$ . Stała  $c_g$  uwzględnia zmniejszenie emisji w ośrodkach optycznie grubych [9] i wynosi od 0,8 do 1. W przypadku typowych pęczków rur  $c_g = 0,85 - 0,9$ .



Rys. 9. Schemat obliczeniowy pęczka zanieczyszczonego

Fig. 9. Computational scheme for the polluted bundle

Podstawiając (11) i (12) do (10):

$$s_{z\infty} = c_s \frac{4 s_1 s_2 - 4 F_z}{L_z} \quad (13)$$

Wprowadzając:

$$b_F = \frac{4 F_z}{\pi D^2} \quad (14)$$

$$b_L = \frac{L_z}{\pi D} \quad (15)$$

oraz względne podziałości  $\sigma_1 = s_1/D$  i  $\sigma_2 = s_2/D$ , otrzymujemy:

$$s_{z\infty} = c_s \frac{4 \sigma_1 \sigma_2 - \pi b_F}{\pi b_L} D \quad (16)$$

Rzeczywiste pęczki ograniczone są ścianami kanału, co zmienia wartość średniej drogi promieni zgodnie z zależnością:

$$s_z = \frac{s_{z\infty}}{x + 1} \quad (17)$$

gdzie:

$$x = \frac{2 s_1 s_2 (1/a + 1/b + 1/c)}{D b_L} \quad (18)$$

przy czym  $a, b, c$  są wymiarami kanału.

Dla nieskończonego pęczka o postaci wg rys. 9 objętość powtarzalnego elementu o długości rur  $b$  wynosi:

$$V_z = (s_1 s_2 - F_z) b \quad (11)$$

gdzie  $F_z$  - powierzchnia przekroju zanieczyszczonej rury.

Powierzchnia opromieniowana:

$$H_z = L_z b \quad (12)$$

gdzie  $L_z$  - obwód przekroju rury zanieczyszczonej.

Stosowane powszechnie zastępowanie wielkości  $s$  przez  $s_{\infty}$  może w przypadku kotłowych pęczków konwekcyjnych powodować błąd sięgający 25%, powodując w efekcie analogiczny błąd: zawyżenie emisyjności spalin.

Wartości stosunków  $b_F$  i  $b_L$  dla typowych osadów przedstawiono poniżej.

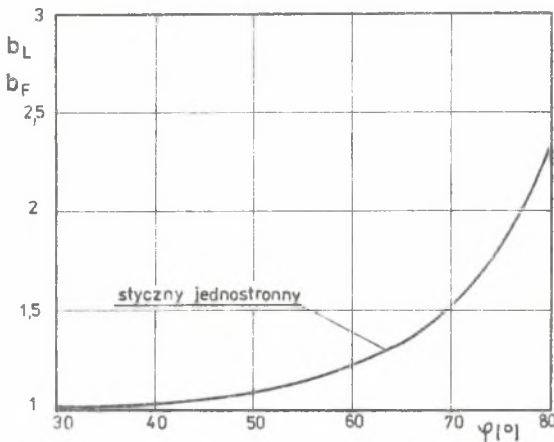
a. Osady styczne - rys. 2

Można udowodnić, że dla osadu jednostronnego styczego:

$$b_F^{JS} = b_L^{JS} = \frac{tg\varphi + \pi - \varphi}{\pi} \quad (19)$$

Dla dwustronnego osadu styczego:

$$b_F^{DS} = b_L^{DS} = \frac{tg\varphi_1 + tg\varphi_2 + \pi - \varphi_1 - \varphi_2}{\pi} \quad (20)$$



Rys. 10. Stosunki  $b_F$  i  $b_L$  dla osadów stycznych jednostronnych  
Fig. 10. Ratios of  $b_F$  and  $b_L$  for tangent one side gridings

Przebieg zmienności stosunków  $b_F$  i  $b_L$  dla osadu jednostronnego przedstawiono na rys. 10. Odpowiednie wartości dla osadu dwustronnego można wyznaczyć ze wzoru:

$$b_F^{DS} = b_L^{DS} = b_F^{JS1} + b_F^{JS2} - 1 \quad (21)$$

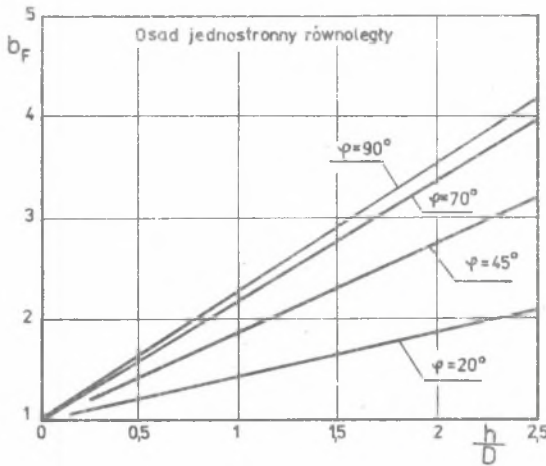
gdzie oznaczenia JS1 i JS2 odpowiadają osadom po obu stronach rury.

b. Osady równoległe - rys. 1

Osad równoległy stanowi wyidealizowany model osadów zestalonych występujących w wysokotemperaturowej części kotła, przy czym spotyka się wyłącznie osady jednostronne. Stosunek powierzchni przekroju rury zanieczyszczonej i czystej  $b_F$  przedstawia wzór:

$$b_F = \frac{\pi - \varphi + 4(h/D)\sin\varphi + 2\sin\varphi - \sin\varphi\cos\varphi + (\pi/2 - 2)\sin^2\varphi}{\pi} \quad (22)$$

Przebieg zmienności  $b_F = f(h/D, \varphi)$  przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11. Stosunek  $b_F$  dla osadu jednostronnego równoległego

Fig. 11. Ratio of  $b_F$  for one side parallel gridding

Stosunek obwodów przekroju rury zanieczyszczonej i czystej wyznaczyć można z zależności:

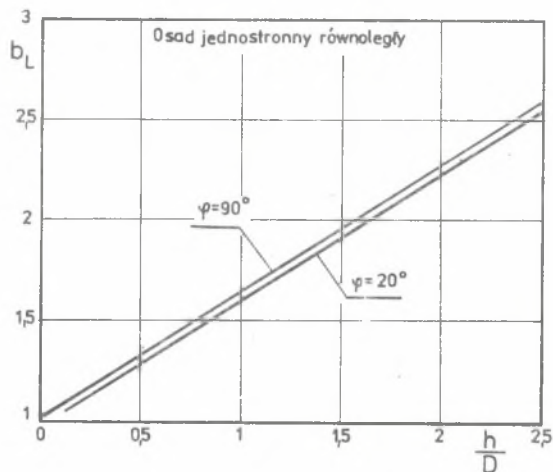
$$b_L = \frac{2(\pi - \varphi) + 4(h/D) - (2 - \pi)\sin\varphi + 2(1 - \cos\varphi)}{2\pi} \quad (23)$$

którą w formie graficznej przedstawia rys. 12.

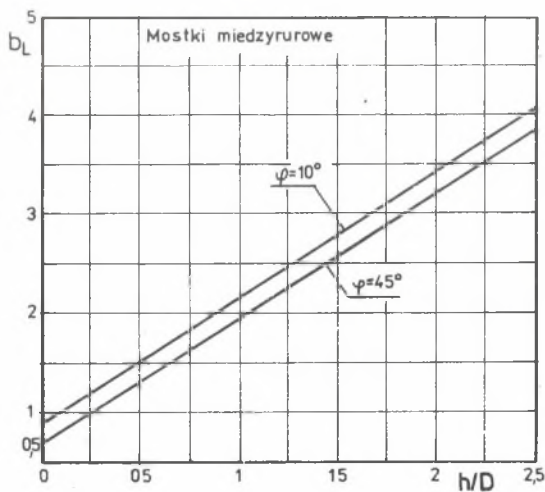
c. Mostki międzyrurowe - rys. 3

Mostki międzyrurowe stanowią, podobnie jak osady styczne, formę zanieczyszczeń syficznych występująca szczególnie w temperaturach spalin od ok. 600 do ok. 800°C. Dla osadów tego rodzaju stosunek powierzchni przekroju rury zanieczyszczonej i czystej  $b_F$  przedstawia zależność:

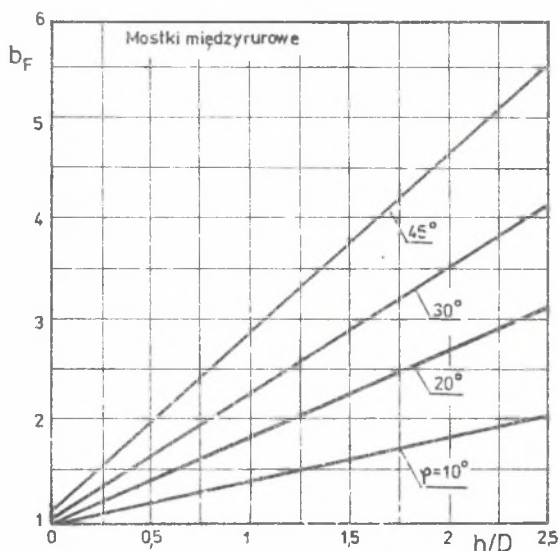
$$b_F = \frac{\pi - 2\varphi - \sin 2\varphi + 4 \sin\varphi(1 + 2h/D)}{\pi} \quad (24)$$



Rys. 12. Stosunek  $b_L$  dla osadu jednostronnego równoległego  
Fig. 12. Ratio of  $b_L$  for one side parallel gridding



Rys. 13. Stosunek  $b_L$  dla mostków popiołowych  
Fig. 13. Ratio of  $b_L$  for ashes bridges



Rys. 14. Stosunek  $b_F$  dla mostków popiołowych

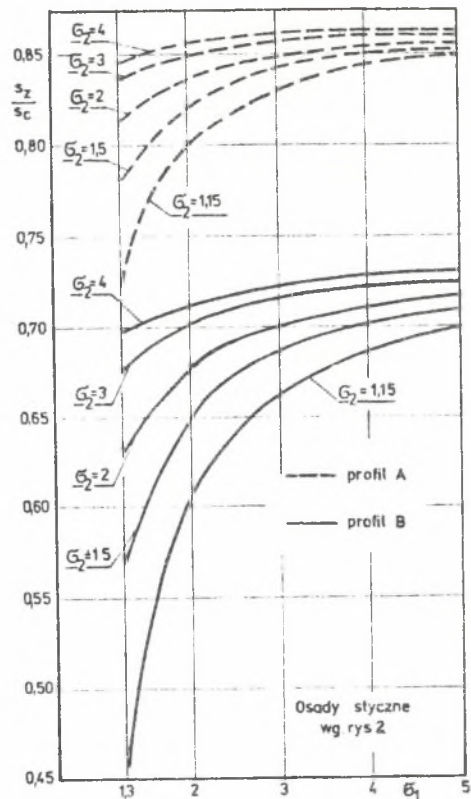
Fig. 14. Ratio of  $b_F$  for ashes bridges

Stosunek obwodów przekroju rury zanieczyszczonej i czystej opisać można wzorem:

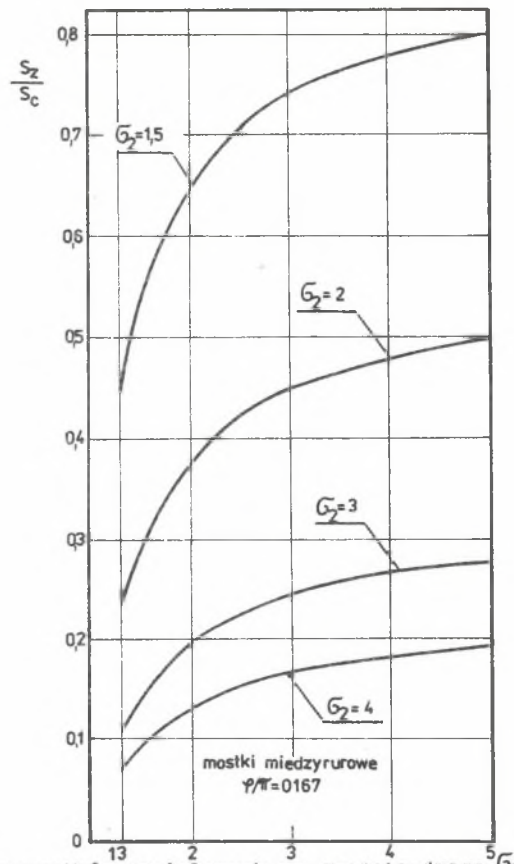
$$b_L = \frac{4(b/D) + 2(1 - \cos \varphi - \varphi) + \pi}{\pi} \quad (25)$$

Zależności (24) i (25) przedstawiono na wykresach rys. 13 i 14. Z badań rzeczywistych osadów wynika, że kąty  $\varphi$  zmieniają się w granicach od ok.  $15^\circ$  do ok.  $40^\circ$ . W związku z tym wartości  $b_F$  i  $b_L$  przedstawiono dla  $\varphi = 10^\circ$  i  $45^\circ$ .

W celu zobrazowania, jak duży wpływ wywiera osad popiołu na średnią drogę promieni, na wykresach rys. 15 i 16 przedstawiono stosunek  $s_z/s_c$  dla osadów stycznych wg rys. 2A oraz dla mostków międzyrurowych o kącie  $\varphi = 30^\circ$  ( $\varphi/\pi = 0,167$ ). Z przedstawionych wykresów wynika, że osady popiołu na powierzchniach konwekcyjnych kotła są powodem istotnego zmniejszenia średniej drogi promieni. Stosunek  $s_z/s_c$  może przyjmować wartości mniejsze od 0,5 w przypadku osadów stycznych, natomiast powstanie mostków popiołowych między rurami może w pewnych przypadkach prawie całkowicie zlikwidować wymianę ciepła na drodze promieniowania. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono bowiem, że emisyjność spalin maleje w przybliżeniu proporcjonalnie do spadku grubości promieniującej warstwy spalin.



Rys. 15. Wpływ zanieczyszczeń sypkich na średnią drogę promieni - oznaczenia przekrojów wg rys. 2  
 Fig. 15. Effect of gridding pollutants on the average path of radiation



Rys. 16. Wpływ mostków popiołowych na średnią drogę  $G_1$  promieni  
 Fig. 16. Effect of ashes bridges on the average path of radiation

Należy nadmienić, że powyższe rozważania dotyczą jedynie gęsto zabudowanych pęczków konwekcyjnej części kotła, nie odnoszą się natomiast do przegrzewaczy grodziowych. W wymiennikach tego typu, z uwagi na duże podziałości poprzeczne i niewielkie wzdłużne, oblicza się średnią drogę promieni traktując grodzie jako elementy płaskie. Powstanie zanieczyszczeń nie wpływa więc w sposób zauważalny na grubość promieniującej warstwy spalin.

#### LITERATURA

- [1] Pronobis M.: Einfluss der Verschmutzung auf den Wärmeaustausch in konvektiven Kesselrohrbündeln. VGB Kraftwerkstechnik, 66 H. 2 (1986).
- [2] Baran M., Pronobis M.: Konvektiver Wärmeübergang bei querangeströmten Membranrohren. VGB Kraftwerkstechnik 62 (1982).
- [3] Pronobis M.: Badanie współczynników wnikania masy metodą sublimacji naftalenu. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka z. 82.
- [4] Kolat P.: Přenos tepla a hmoty. Skrypt VŠB Ostrava, Ostrava 1986.
- [5] Pronobis M.: Analogie zwischen dem konvektiven Wärmeübergang und dem Massenaustausch bei querangeströmten Rohrbündeln. Wärme - und Stoffübertragung 23 (1988).
- [6] Popiel C.O., Bogusławski L.: Badanie procesów konwekcji masy i ciepła metodą sublimującego naftalenu. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Chemia i Inżynieria Chemiczna, nr 18, 1986.
- [7] Brauer H.: Untersuchungen an Querstrom-Wärmeaustauschern mit verschiedenen Rohrformen. VGB 1961 H. 8.
- [8] Lisejkin I.D., Andrejewa A.J.: Issledowanije tieplootdaczii i aerodinamiceskogo soprotiwlenija w membrannych konvektivnyh puczках trub s profilnymi prostawkami. Tieploenergetika 1974, nr 9.
- [9] Wiśniewski S.: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1979.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Wiśniewski

#### КОНВЕКЦИОННЫЕ И РАДИАЦИОННЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ ТЕПЛА ОТ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ К ЗАГРЯЗНЕННЫМ КОТЕЛЬНЫМ ТРУБАМ

#### Р е з ю м е

Осадки пепела на поверхностях котельных конвекционных пучков изменяют поперечное сечение труб, что влечет за собой изменение конвекционных и радиационных коэффициентов проникновения тепла. В работе представлены результаты модельных исследований проникновения тепла путем конвекции и расчет толщины радиационного слоя продуктов сгорания для пучков покрытых наиболее часто встречаемыми видами осадков.



CONVECTION AND RADIATION COEFFICIENTS OF THE HEAT ABSORPTION  
FROM COMBUSTION GAS TO POLLUTED BOILER TUBES

S u m m a r y

Ashes covering the surfaces of the boiler bundles cause changes of cross cuttings of tubes that implies changes in convection and radiation coefficients of heat absorption. The paper presents results of experiments modeling heat transport by convection and computing thickness of radiation layer for the bundles covered by the most often types of gridding.