

Kamil KOLARČIK

Katedra Energetyki

Vysoká Škola Báňská v Ostrave

OBLICZENIA MINIMALNEJ PRĘDKOŚCI FLUIDYZACJI DLA CZECHOSŁOWACKICH KOTŁÓW FLUIDALNYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono rezultaty prac nad rozwijaniem nowych metod badawczych zachowania warstwy fluidalnej. Szczegółowo przedstawiono sposób obliczeń minimalnej prędkości fluidalnej. Uzyskane wyniki są podbudowane praktycznymi i systematycznymi pomiarami na wszystkich typach kotłów fluidalnych eksploatowanych w Czechosłowacji. Rezultaty tych prac były podstawą propozycji projektów konstrukcyjnych paleniska i systemów zasilania paliwem kotła fluidalnego w Ciepłowni TRMICE (TTR).

Podstawą rozwoju nowoczesnego społeczeństwa, które zaspokaja potrzeby swych członków jest zapewnienie dostatecznych źródeł energii. O tym, jakimi środkami swoje potrzeby energetyczne pokryje, decyduje każde państwo według zasobności własnych źródeł, ich efektywności i opłacalności w porównaniu z poziomem światowych cen, możliwości transportu przy zachowaniu warunku, aby systemy energetyczne nie były uciążliwe dla środowiska naturalnego.

W tym zamyśle celem czechosłowackiej energetyki jest harmonijny związek energii jądrowej, energii opartej na własnych surowcach i importowanym gazie ziemnym i ropie naftowej z wykorzystaniem potencjału wodnego i zasobów węgla.

Opierając się na tych założeniach należy przedsięwziąć zmiany strukturalne w produkcji energii elektrycznej z wykorzystaniem energii jądrowej.

Całkowita moc zainstalowana naszych jądrowych urządzeń w obecnej dobie wynosi 3250 MW. W 1988 roku na bazie reakcji jądrowej wyprodukowano około 23 miliardy kWh energii elektrycznej, co wynosi ponad 26% całej produkcji energii elektrycznej w Czechosłowacji.

Obecnie dochodzi do stopniowego spadku produkcji energii elektrycznej w klasycznych siłowniach parowych z poziomu 54 miliardy kWh w 1985 roku do poziomu 49,6 miliarda kWh w 1988 roku.

Pomimo postępującego rozwoju energetyki jądrowej węgiel pozostanie nadal niezastąpiony (w 2000 roku będzie dawał jeszcze 50% czechosłowackiego bilansu energetycznego) zwłaszcza w centralnym zaopatrzeniu w ciepło.

Efektywne wykorzystanie naszych podstawowych węgli brunatnych jest nierozzerwalnie związane z problematyką spalania wysokopopiołowych węgli o niskiej wartości opałowej i zwiększonej zawartości siarki.

Przeciętna wartość opałowa węgla brunatnego z Zagłębia Północno-czeskiego obniżyła się z $16,75 \text{ MJ kg}^{-1}$ w 1945 roku do $12,51 \text{ MJ kg}^{-1}$ w 1980 roku.

Dalszym problemem jest wykorzystanie wysokopopiołowych węgli pozabilansowych o wartości opałowej $(5,4-8,3) \text{ MJ kg}^{-1}$, które stanowią również niepomijalne źródło czemosłowackiej bazy paliwowo-energetycznej.

Czechosłowacki kompleks paliwowo-energetyczny będzie zmuszony do racjonalnego wykorzystania niskokalorycznych wysokozasiarczonych węgli brunatnych z dostateczną sprawnością, niezawodnością, z wymaganą wydajnością i obniżeniem szkodliwych dla środowiska przyrodniczego wysokich emisji SO_2 .

Jednym z rozwiązań tego problemu jest zastosowanie techniki fluidalnej w procesach spalania, która gwarantuje efektywne spalanie węgla o wysokiej zawartości popiołu i siarki.

Opracowany program rozwoju czemosłowackiego ciepłownictwa przewiduje tylko w Republice Czeskiej do roku 2000 budowę 23 kotłów parowych, o sumarycznej wydajności 2790 th^{-1} pary, opalanych węglem brunatnym niższej jakości, z możliwością zastosowania paliwa pozabilansowego z odkrywek SHR.

Prognoza przewiduje docelową realizację pełnego wariantu fluidalnego, to znaczy, że po roku 1990 kotły z paleniskami klasycznymi nie będą budowane.

Z tego względu w Katedrze Energetyki VŠB w Ostrawie zwrócono szczególną uwagę na metody badawcze procesu spalania w paleniskach fluidalnych czemosłowackich kotłów. Konieczne było opracowanie metodyki kompleksowych pomiarów kotłów w czasie ich eksploatacji, nie tylko wielkości wejściowych i wyjściowych, ale wszystkich wielkości, które wpływają na jakość spalania.

Do sporządzenia bilansu masowego i cieplnego oraz opisu aerodynamiki warstwy fluidalnej konieczne jest określenie poniższych wielkości:

- całkowitego, dynamicznego i pulsacyjnego ciśnienia,
- temperatury w miejscu pomiaru,
- średniej gęstości cząstek, czynnika fluidyzującego i warstwy fluidalnej,
- rzeczywistej prędkości czynnika i minimalnej prędkości fluidyzacji cząstek,
- turbulentnych współczynników transportu,
- zmian wysokości i ekspansji warstwy przy zmianie prędkości fluidyzacji,
- koncentracji CO_2 , CO , O_2 , SO_2 , NO_x i substancji palnych na drodze spalania.

Z powyższego zestawienia wynika, że podstawową wielkością, która opisuje przebieg i stopień fluidyzacji, jest prawidłowo wyznaczona minimalna prędkość fluidyzacji cząstek.

Według dostępnej literatury fachowej, traktującej o zachowaniu warstwy fluidalnej, minimalną prędkość fluidyzacji można obliczyć za pomocą trzech znanych metod:

- 1) metody opartej na obliczeniu granicznych prędkości za pomocą kryterium Laszczenki,
- 2) metody wychodzącej z p. 1, z tym że minimalna prędkość fluidyzacji wyliczana jest z kryterium Reynoldsa,
- 3) metody opartej na znanych wartościach kryterium spadku swobodnego. Szczegółowo wszystkie metody opisano w [1].

Praktyczne pomiary w paleniskach fluidalnych wszystkich typów kotłów eksploatowanych w Czechosłowacji pokazały, że dla opisu polidispersyjnej warstwy fluidalnej najlepsza jest metoda obliczeń minimalnej prędkości fluidyzacji oparta na znajomości kryterium Laszczenki.

W tej metodzie wychodzimy z równania kryterium Archimedesesa:

$$Ar = \frac{d_i^3}{\nu_G^2} g \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \quad (1)$$

które możemy przekształcić do postaci:

$$Ar^{1/3} = \frac{d_i}{\beta \nu_G} \quad (2)$$

gdzie współczynnik pomocniczy β określono w sposób następujący:

$$\beta = \left[\frac{\rho_g}{\rho_g \nu_G (\rho_s - \rho_g)} \right]^{1/3} \quad (3)$$

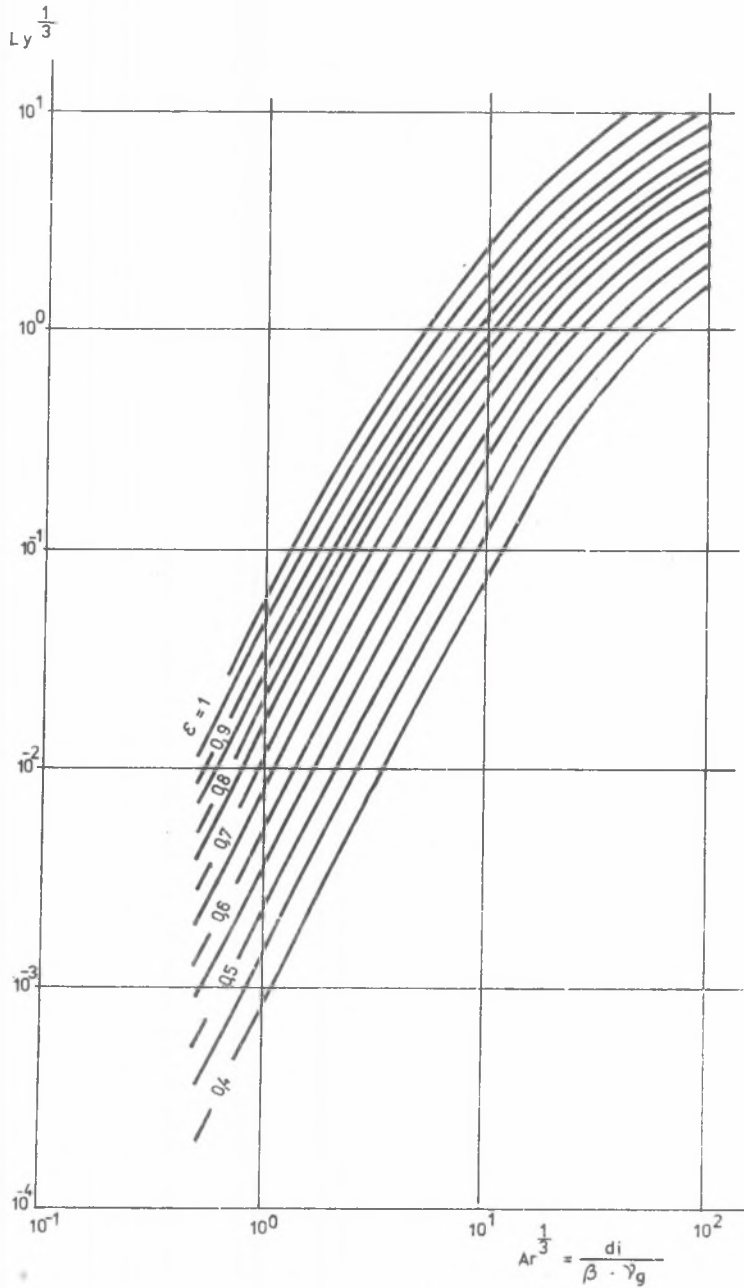
Tak zmodyfikowane kryterium Archimedesesa dla minimalnej prędkości fluidyzacji cząstek odnosi się do cząstek o geometrii kulistej. Dla cząstek niekulistych modyfikujemy kryterium Archimedesesa współczynnikiem sferyczności (współczynnikiem kształtu) Ψ do postaci:

$$Ar_0 = \Psi Ar \quad (4)$$

Zależność kryterium Laszczenki od kryterium Archimedesesa w postaci:

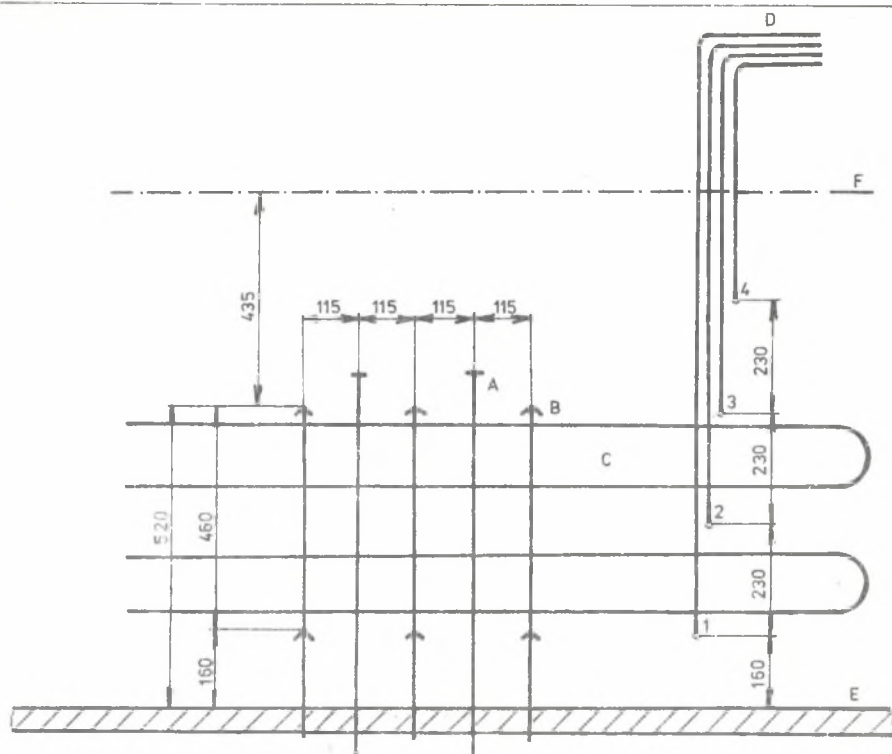
$$L_y^{1/3} = f(Ar_0)^{1/3} \quad (5)$$

jest przedstawiona na rys. 1.



Rys. 1. Zależność liczby kryterialnej Laszczénki od liczby kryterialnej Archimedesesa

Fig. 1. Dependence of Lashtchenko number on Reynolds number



Rys. 2. Schemat pomiarów temperatur i ciśnienia w warstwie fluidalnej KF TTR

A - doprowadzenie paliwa, B - doprowadzenia powietrza, C - rury odparownika, D - sonda pomiarowa, E - ruszt fluidalny, F - poziom warstwy fluidalnej

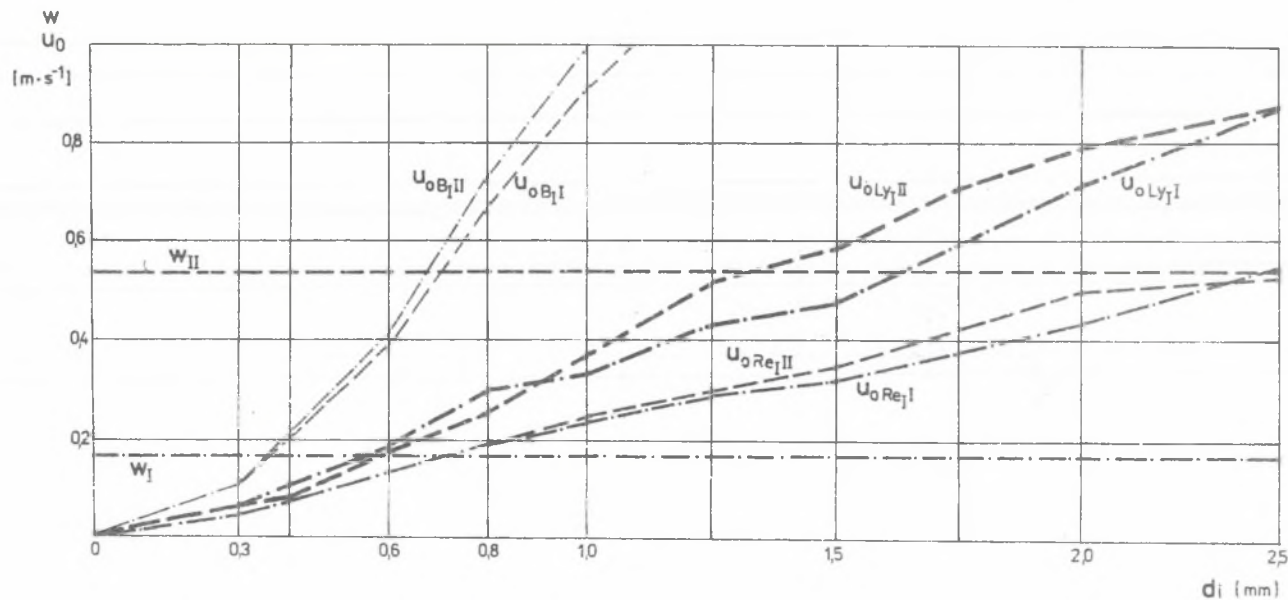
Fig. 2. The scheme of the temperature and pressure measurements in the fluidised bed KF TTR

Następnie minimalną prędkość fluidyzacji można wyliczyć z końcowego stosunku:

$$u_o(I_y) = \frac{I_y^o}{\beta} \quad (6)$$

Do pomiarów ciśnienia, a przede wszystkim temperatur potrzebnych do obliczeń minimalnej prędkości fluidyzacji, w mierzonych paleniskach została umieszczona sonda z żaroodpornej stali. Sonda zbudowana jest z kilku rurek o wylotach (wlotach) na różnych poziomach. W każdym wylocie umieszczony jest termoelement płaszczyznowy do mierzenia temperatury w punkcie pomiaru ciśnienia całkowitego.

Schemat tego sposobu pomiaru przedstawiony jest dla kotła fluidalnego Ciepłowni TRMICE (TTR) na rys. 2.



Rys. 3. Porównanie rzeczywistych prędkości gazu z minimalnymi prędkościami fluidyzacji. KF TTR - punkt pomiarowy (poziom) 1

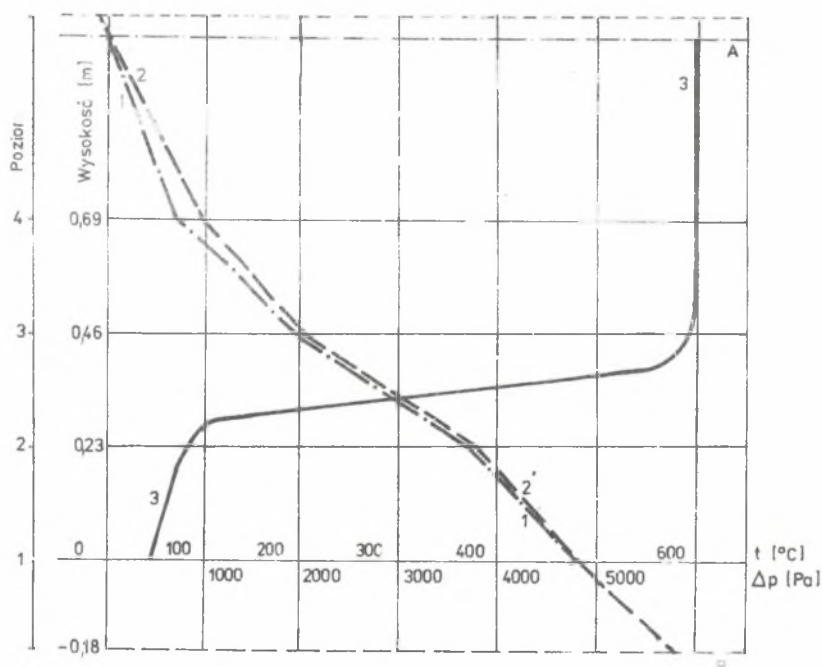
Fig. 3. A comparison of the real gas velocities with the minimal fluidisation velocity

W celu porównania parametrów aerodynamicznych warstwy fluidalnej w pracy przedstawiono wyniki pomiarów dla dwóch różnych reżimów eksploatacji oznaczonych: pomiar I, II.

Główne różnice między tymi reżimami polegały na różnej wartości strumienia podawanego wtórnego powietrza. Strumień powietrza dla pomiaru wynosił $4,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a dla pomiaru II do komory spalania doprowadzono $6,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ powietrza wtórnego.

Do określenia rzeczywistych prędkości gazu wzdłuż wysokości warstwy fluidalnej służyły panelowe mierniki przepływu powietrza. Wartości tych prędkości osiągnęły w pomiarze I poziom w zakresie $(0,164-1,25) \text{ ms}^{-1}$, a w pomiarze II poziom $(0,5-1,694) \text{ ms}^{-1}$.

Przy porówniu rzeczywistych prędkości w warstwie z minimalnymi prędkościami fluidyzacji na podstawie znajomości temperatur możemy określić stopień (liczbę) fluidyzacji danego reżimu, to znaczy stwierdzić, które cząstki będą sifluidyzowane, a które zostaną nieruchome i muszą być poderwane z dna paleniska.

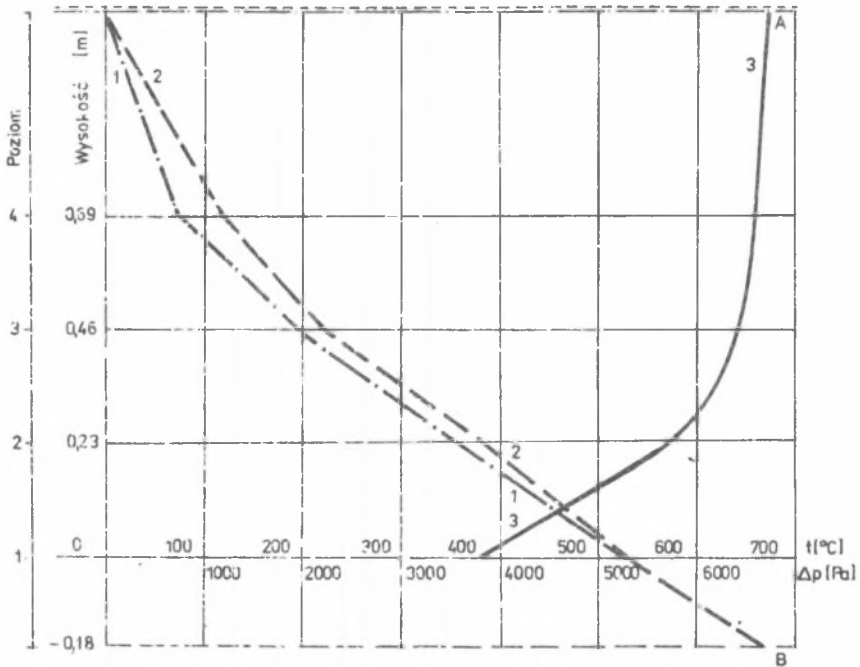


Rys. 4. Przebiegi temperatury i ciśnienia wzdłuż wysokości warstwy fluidalnej. Pomiar I - KF TTR

A. poziom warstwy fluidalnej, B. odbiór ciśnienia powietrza wtórnego pod rusztem

1. ciśnienie statyczne, 2. ciśnienie całkowite, 3. temperatura

Fig. 4. Temperature and pressure distributions along the height of the fluidised bed. The measurement I - KF TTR



Rys. 5. Przebiegi temperatury i ciśnienia wzdłuż wysokości warstwy fluidalnej. Pomiar II - KF TTR

A. poziom warstwy fluidalnej, B. odbiór ciśnienia powietrza wtórnego pod rusztem

1. ciśnienie statyczne, 2. ciśnienie całkowite, 3. temperatura

Fig. 5. Temperature and pressure distribution along the height of the fluidised bed. The measurement II - KF TTR

Z graficznego porównania obu prędkości i obserwacji skutecznej eksploatacji wynika, że minimalne prędkości fluidyzacji określone za pomocą kryterium Reynolda ($u_{0,0}(Re)$) wychodzą niżej, a odwrotnie - prędkości fluidyzacji określone za pomocą kryterium spadku swobodnego i odpowiadające im prędkości opadania przyjmują wartości niewspółmiernie wysokie.

Jako przykład można przytoczyć wyniki uzyskane w kotle fluidalnym TTR w punkcie pomiarowym I przedstawione na rys. 5. Można stąd wywnioskować, że przy pomiarze I wprowadzone w stan fluidyzacji są cząstki mniejsze niż 0,57 mm, to znaczy, że w tym obszarze fluidyzuje około 23% objętości cząstek. Natomiast w pomiarze II w stan fluidyzacji wprowadzone są cząstki mniejsze niż 1,35 mm, to jest około 57% objętości wszystkich cząstek w warstwie.

Można zatem wnioskować, że w pomiarze II stopień fluidyzacji jest o wiele wyższy niż w pomiarze I. Fakt ten potwierdzają również przebiegi

zmierzonych temperatur przedstawione na rys. 4 i 5. Tym samym sposobem określamy stopień fluidyzacji na całej wysokości warstwy.

PODSUMOWANIE

W artykule przeprowadzono analizę kilku wielkości, które determinują zachowanie warstwy fluidalnej. Jest to zagadnienie złożone.

Według naszych dotychczasowych badań jedynie droga kompleksowych pomiarów wszystkich wyżej omawianych wielkości, które determinują proces spalania, jest prawidłowa i dająca się zastosować we wszystkich typach fluidalnych i innych palenisk w Czechosłowacji.

Należy uznać, że pomiary tylko wejściowych i wyjściowych parametrów paliwa, powietrza, spalin, substancji szkodliwych itd. są niedość skuteczne z punktu widzenia ekonomicznego i technicznego, a przede wszystkim ekologicznego.

Konieczny jest systematyczny pomiar wielkości określających aerodynamikę (hydrodynamikę) spalania i tworzenia substancji szkodliwych w różnych miejscach drogi spalania. Jedynie na podstawie tak określonych wyników eksploatacji palenisk można realizować konstrukcyjne i aerodynamiczne koncepcje kotłów oraz ograniczyć tworzenie szkodliwych substancji.

OBJAŚNIENIA OZNACZEŃ I SKROTÓW

- d_i - średnica cząstek i -tej frakcji, m
 g - stała grawitacyjna, ms^{-2}
 h - wysokość, m
 P_c - ciśnienie całkowite, Pa
 t - temperatura, $^{\circ}\text{C}$
 u_0 - minimalna prędkość fluidyzacji, m s^{-1}
 w - rzeczywista prędkość gazu (czynnika fluidyzującego), m s^{-1}
 β - współczynnik pomocniczy
 ν_g - współczynnik lepkości kinematycznej gazu, m^2s^{-1}
 ρ_s - gęstość cząstek, kg m^{-3}
 ρ_g - gęstość gazu (czynnika fluidyzującego), kg m^{-3}
 współczynnik kształtu (sferyczności),
 Ar - liczba kryterialna Archimedesesa,
 Iy - liczba kryterialna Iaszczenki,

KF - kocioł fluidalny,
 SHR - Severoceski hnedouhelny revir,
 TTR - ciepłownia TRMICE

LITERATURA

- [1] Kolarčík K.: Příspěvek k aerodynamice spalování ve fluidních ohništích. Praca doktorska, VŠB, Ostrava 1987.
- [2] Kolat P.: Nové metody posuzování spalovacího procesu ohnišť kotlů velkých výkonů. Artykuł przyjęty do druku. Energetika.
- [3] Krumnikl A.: Nové přístupy k rozvoji čs. palivoenergetické základny. Energetika 1989 nr 1.
- [4] Knor F. i in.: Možnosti využití vysocepopelnatých uhlí fluidním spalováním. Energetika 1983 nr 3.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ludwik Gwynar

ИСЧИСЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ ДЛЯ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ В ЧЕХОСЛОВАКИИ

Р е з ю м е

В настоящей статье представлены результаты работ касающихся развития новых исследовательских методов сохранения кипящего слоя. Подробно представлен способ исчислений наименьшей скорости псевдоожигения частиц полидисперсного кипящего слоя.

Для подтверждения полученных результатов использованы промышленные исследования котельных агрегатов с кипящим слоем, эксплуатируемых в Чехословакии.

Результаты этих работ стали основой для конструкционных проектов топков и систем дозирования топлива котла оборудованного топкой с псевдоожиженным слоем в теплоцентраль Трмице.

THE METHOD OF CALCULATION OF THE MINIMAL FLUIDISATION VELOCITY FOR CZECHOSLOVAKIAN FLUIDISED BED BOILERS

S u m m a r y

In the paper results of the research of a new methods of fluidised bed characteristics are presented. The method of calculations of minimal fluidisation velocity is shown.

The obtained results has been supported by the practical and systematic measurements of the all type of the fluidised bed boilers exploited in Czechoslovakia.

The results of these researches were the foundation for the suggestion of the constructional designs of firing and coal filling system of fluidised bed boiler in the heating plant TRMICE.