

Józef CZEPIEL

Kazimierz MROCZEK

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych  
Politechnika Śląska

## BADANIA MODELOWE UKŁADU MIELĄCEGO MŁYNA PIERŚCIENIOWO-KULOWEGO

Część II. Wpływ prędkości katowej układu mielącego na jego wydajność i zużycie energii na przemiał

Streszczenie. Przedstawiono wyniki pomiarów wpływu prędkości katowej modelowego układu mielącego pierścieniowo-kulowego na jego wydajność i zużycie energii na przemiał węgla kamiennego dla dwóch nadaw różniących się składem granulometrycznym. Przeprowadzono dyskusję uzyskanych wyników, ich interpretację fizyczną i sformułowano wnioski. Stwierdzono, że wydajność układu mielącego rośnie w przybliżeniu proporcjonalnie z prędkością katową do pewnej granicy, po czym stabilizuje się.

### 1. WSTĘP

Według aktualnie stosowanej metody doboru prędkości katowej jej wartość optymalną wyznacza się na podstawie uproszczonego modelu ruchu podanego przez Romadina [1] zgodnie ze wzorem:

$$\omega = \sqrt{\frac{8g}{D_p(4 - \alpha_1 + \alpha_2)} \ln \frac{\cos(\alpha_1 - \psi)}{\cos(\alpha_1 + \psi)}} \quad (1)$$

gdzie:

- $g$  - przyspieszenie grawitacyjne,
- $D_p$  - średnica podziałowa układu mielącego,
- $\alpha_1, \alpha_2$  - odpowiednio, wewnętrzny i zewnętrzny kąt opasania kuli,
- $\psi$  - kąt tarcia węgla o stal.

Istnieją przypuszczenia, że stosowane prędkości mielenia młynów przemysłowych są w niektórych przypadkach zbyt duże. Stan taki powodowałby zwiększone zużycie energii na przemiał i nadmierną erozję elementów mielących przy być może nieznacznie tylko większej wydajności młyna. Sytuacja ta m.in. uzasadnia podjęcie badań wpływu prędkości katowej układu mielącego na charakterystykę jego pracy zarówno w skali laboratoryjnej, jak i ich weryfikacji w skali rzeczywistej.

Badania laboratoryjne przeprowadzono na stanowisku doświadczalnym opisanym w [4] wg przedstawionej tam metodyki badań. Zastosowano doświadczalny układ mielący 10-kulowy o średnicy kul 100 mm. Układ ten jest geometrycznie podobnym modelem układu mielącego młyna przemysłowego MKM-33 wykonanym w skali 1:7,5.

Zgodnie z przyjętymi założeniami [4], jako materiał mielony zastosowano węgiel kamienny klasy ziarnowej 0-2 mm o następującej charakterystyce:

- pozostałości sitowe (wartości przec.)	$R_{0,06} = 90,3\%$
	$R_{0,09} = 87,6\%$
	$R_{0,15} = 82,7\%$
	$R_{0,25} = 73,7\%$
	$R_{0,5} = 58,9\%$
	$R_1 = 27,7\%$
	$R_2 = 0,9\%$
- zawartość wilgoci przemijającej	$W_{ex} = 2,1\%$
- zawartość wilgoci higroskopijnej	$W_h = 2\%$

Wykonano również pomiary układu mielącego z zastosowaniem węgla klasy ziarnowej 0-7,5 o charakterystyce:

- pozostałości sitowe (wartości przec.)	$R_{0,06} = 93,4\%$
	$R_{0,09} = 91,3\%$
	$R_{0,15} = 87,4\%$
	$R_{0,25} = 81,6\%$
	$R_{0,5} = 73,3\%$
	$R_1 = 56,1\%$
	$R_2 = 38,1\%$
	$R_5 = 11,9\%$
- zawartość wilgoci przemijającej	$W_{ex} = 3,5\%$
- zawartość wilgoci higroskopijnej	$W_h = 2\%$
- podatność przemiałowa (metoda Hardgrove'a)	$G_{rH} = 62^\circ$
- zawartość popiołu	$A^r = 25\%$

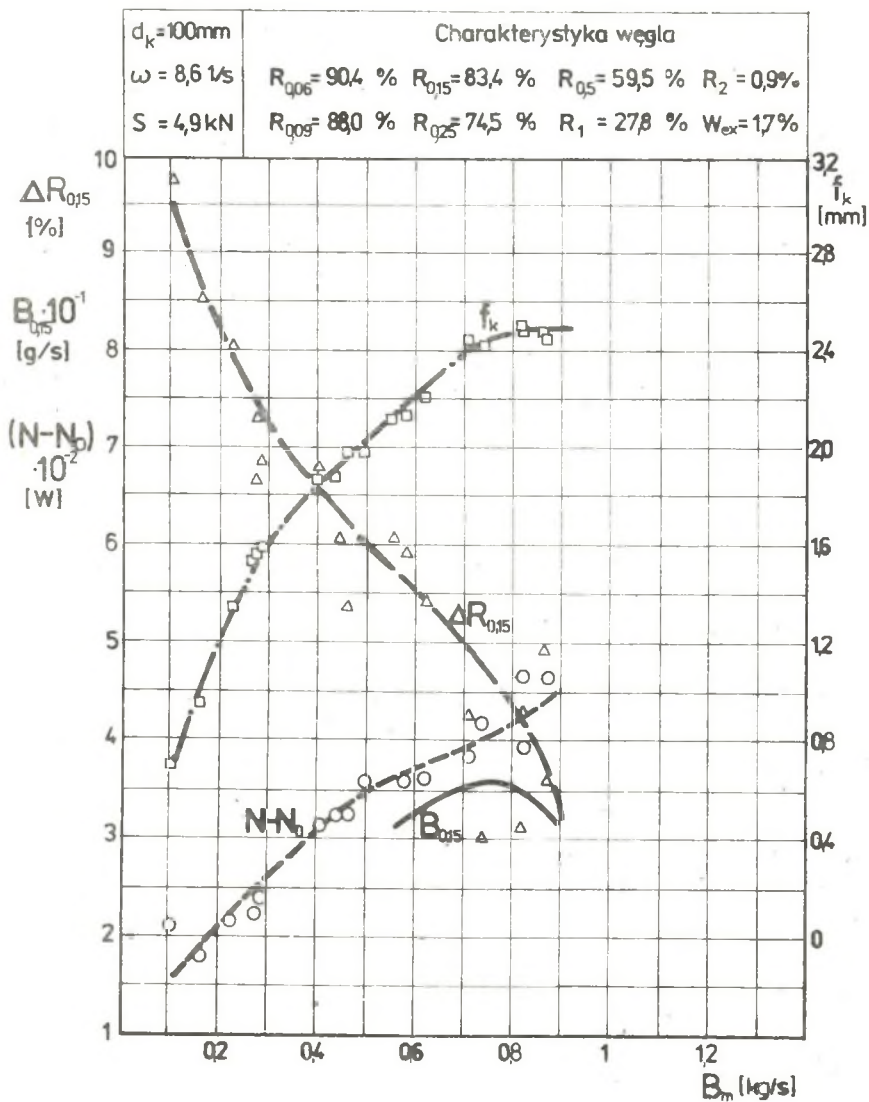
## 2. WYNIKI POMIARÓW I ICH ANALIZA

Wyniki pomiarów przedstawiono w formie wykreslonej na rys. 1 do 6.

### 2.1. Charakterystyki podstawowe

Podstawowymi charakterystykami pomiarowymi są zależności:

- efektu rozdrabniania (efektu mielenia)  $\Delta R_x$ ,
- mocy mielenia  $N - N_0$ ,
- grubości mieliwa pod kulami układu mielącego  $f_k$ ,
- wydajności układu mielącego  $B_x$ ,



Rys. 1. Podstawowe charakterystyki pomiarowe układu mielącego 10-kulowego dla prędkości kątowej  $\omega = 8,6 \text{ 1/s}$

Fig. 1. Basic measuring characteristics of 10-ball grinding system for the angular velocity  $\omega = 8,6 \text{ 1/s}$

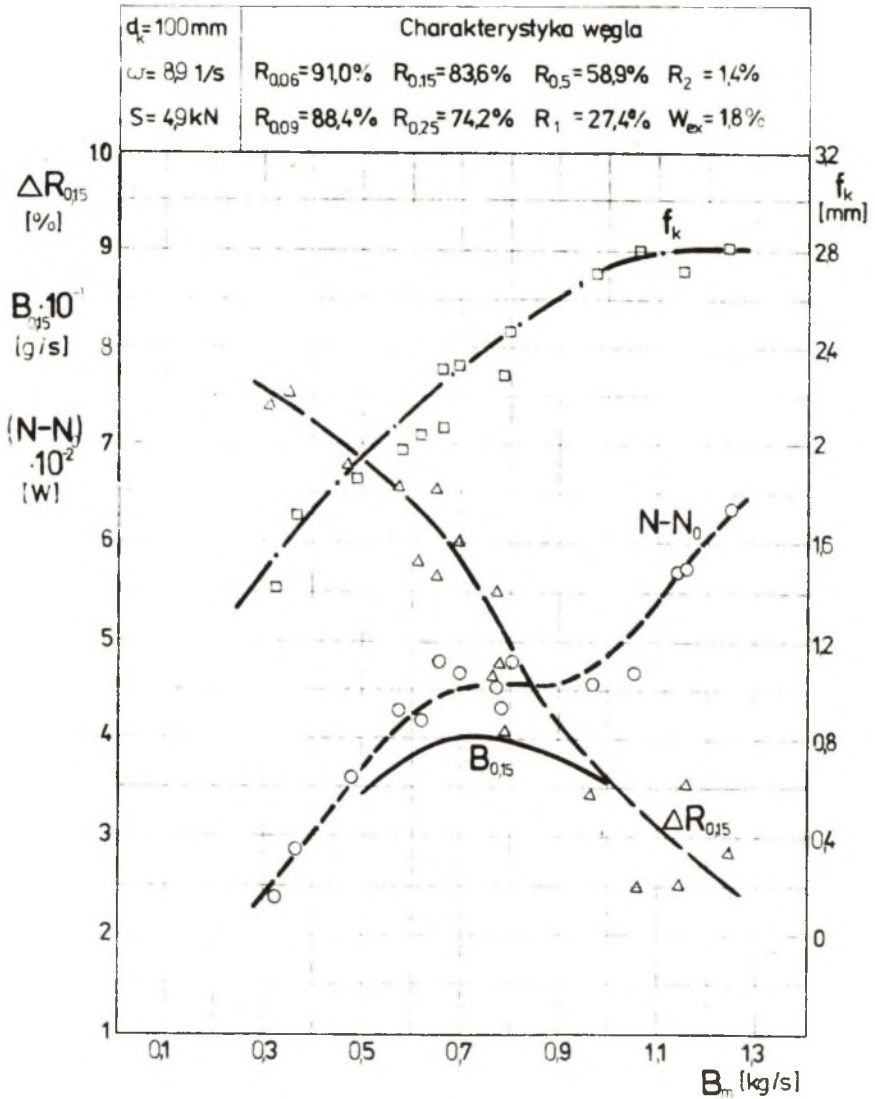
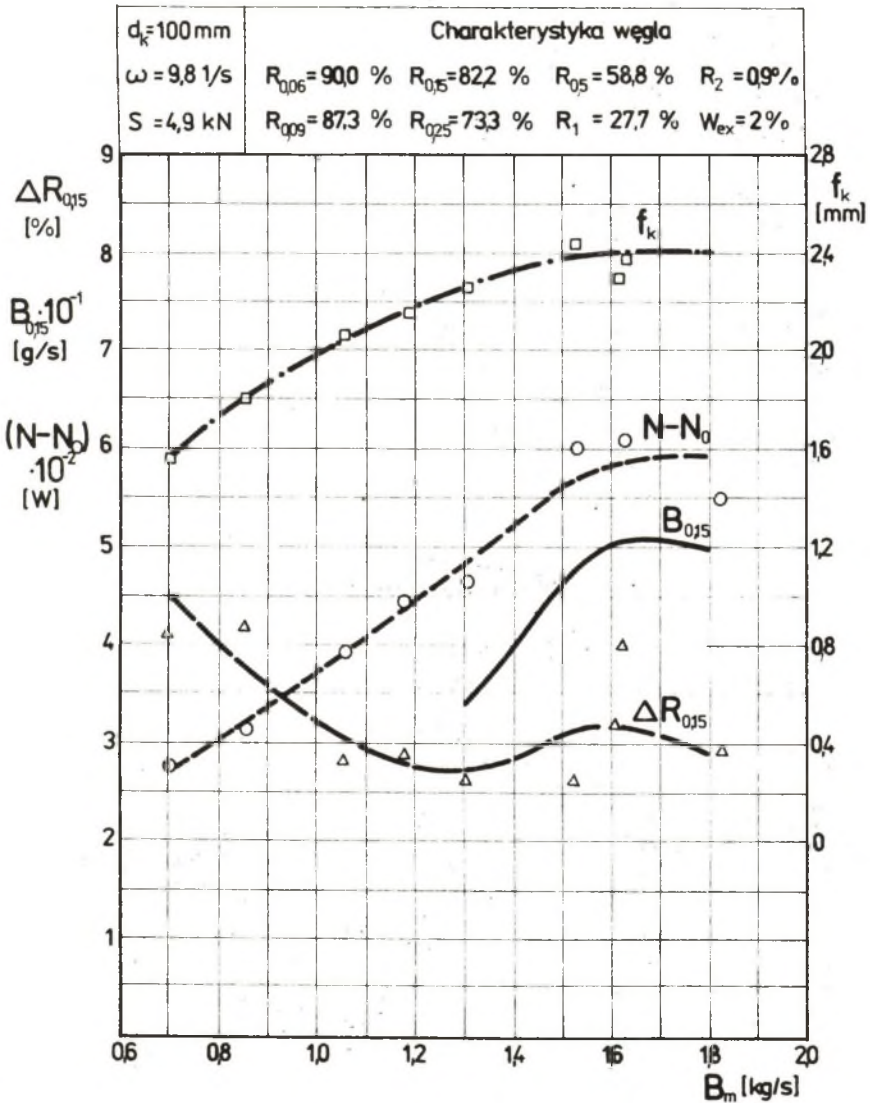


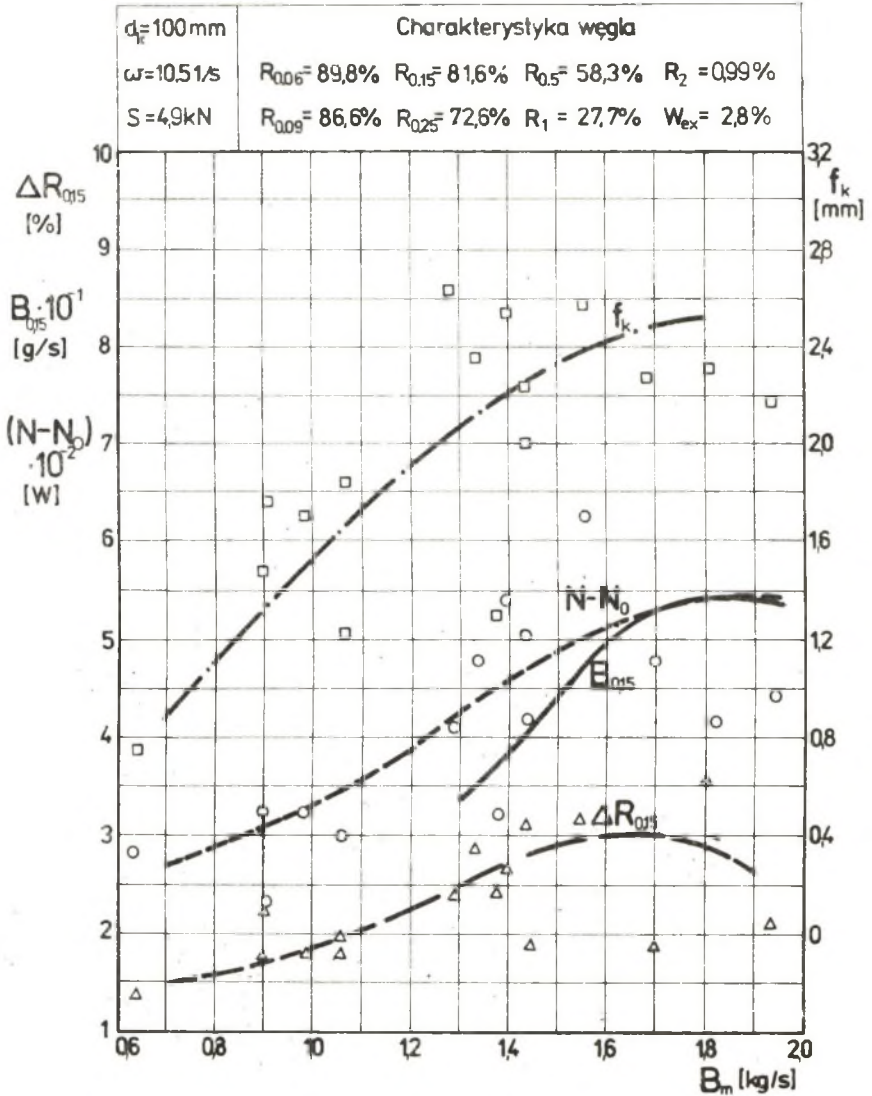
Fig. 2. Podstawowe charakterystyki pomiarowe układu mielącego 10-kulowego dla prędkości kątowej  $\omega = 8,9 \text{ 1/s}$

Fig. 2. Basic measuring characteristics of 10-ball grinding system for the angular velocity  $\omega = 8,9 \text{ 1/s}$



Rys. 3. Podstawowe charakterystyki pomiarowe układu mielącego 10-kulowego dla prędkości kątowej  $\omega = 9,8 \text{ 1/s}$

Fig. 3. Basic measuring characteristics of 10-ball grinding system for the angular velocity  $\omega = 9,8 \text{ 1/s}$



Rys. 4. Podstawowe charakterystyki pomiarowe układu mielącego 10-kulowego dla prędkości kątowej  $\omega = 10,5$  1/s

Fig. 4. Basic measuring characteristics of 10-ball grinding system for the angular velocity  $\omega = 10,5$  1/s

od masowego strumienia mieliwa doprowadzanego do układu mielącego  $B_m$ . Charakterystyki podstawowe dla węgla klasy ziarnowej 0-2 mm uzyskane dla różnych prędkości kątowych pierścienia miażdżącego  $\omega$  przedstawiono na rys. 1 do 4. Typowy przebieg charakterystyk podstawowych opisano i zinterpretowano w pracy [4]. Charakterystyki uzyskane dla prędkości  $\omega = 9,8$  1/s i  $\omega = 10,5$  1/s (a w szczególności charakterystyka  $\Delta R_x = f(B_m)$  przy prędkości 10,5 1/s) mają przebieg odmienny od typowego w zakresie strumieni mieliwa  $B_m$  mniejszych od wartości strumienia granicznego  $B_m^m$ . Przyczyną tej odmienności jest doświadczalnie stwierdzone zjawisko przesypania się części strumienia węgla przez bieżnię pierścienia miażdżącego bez udziału w rozdrabnianiu. Zjawisko to występuje bardzo wyraźnie przy małych wartościach strumienia  $B_m$  i słabnie z jego wzrostem. Towarzyszy mu wzrost grubości warstwy mieliwa oraz wzrost efektu rozdrabniania.

Charakter przebiegu zależności  $\Delta R_{0,15} = f(B_m)$  (rys. 4) świadczy o tym, że coraz większa część strumienia  $B_m$  uczestniczy w rozdrabnianiu. Jak bowiem wynika z własnych badań quasistatycznego miażdżenia węgla, jednostkowy efekt rozdrabniania maleje ze wzrostem grubości warstwy miażdżonej, a więc jeżeli mimo spadku tego efektu w mielonej części strumienia  $B_m$  wypadkowy efekt rozdrabniania  $\Delta R_{0,15}$  rośnie, to świadczyć może to jedynie o ograniczaniu się zjawiska przesypania mieliwa. Niezależnie wykonane pomiary prędkości wypływu mieliwa z pierścienia miażdżącego zjawisko to potwierdzają.

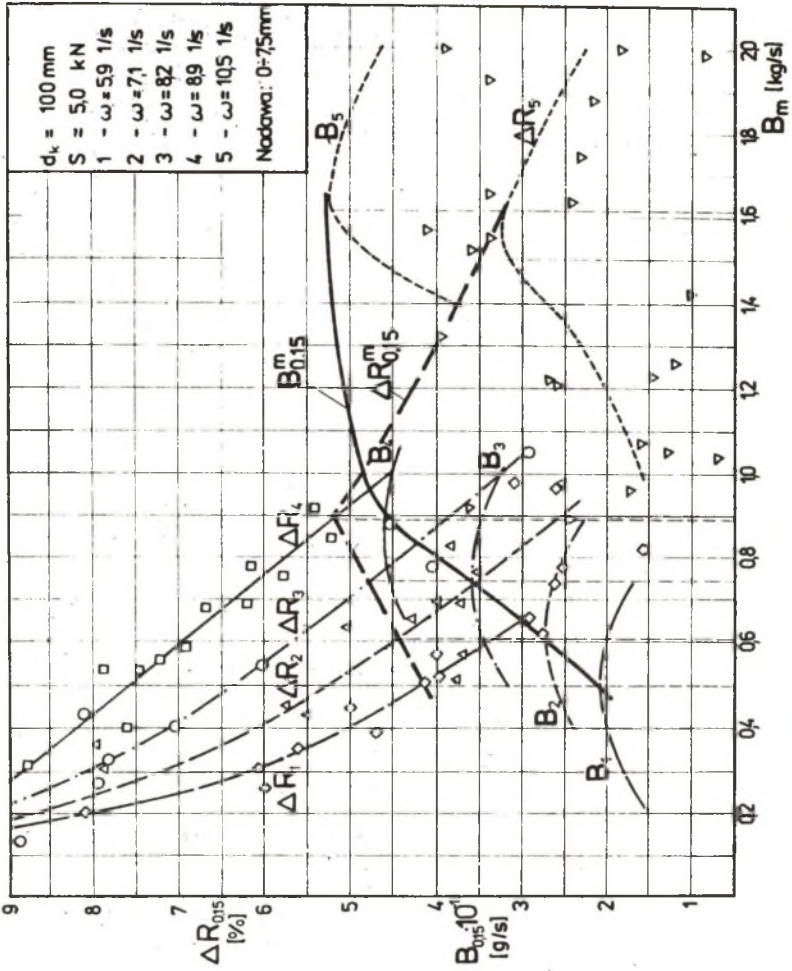
Po osiągnięciu przez zależność  $\Delta R_x = f(B_m)$  wartości maksymalnej dalszy charakter jej przebiegu ma cechy charakterystyki typowej.

Z porównania poziomu wydajności układu  $B_x$  np. dla prędkości 8,9 1/s i prędkości 10,5 1/s wynika, że wydajność układu ma dla prędkości wyższej wartość wyższą. Wzrostowi temu towarzyszy jednak wyraźny spadek efektu rozdrabniania.

## 2.2. Charakterystyki uniwersalne

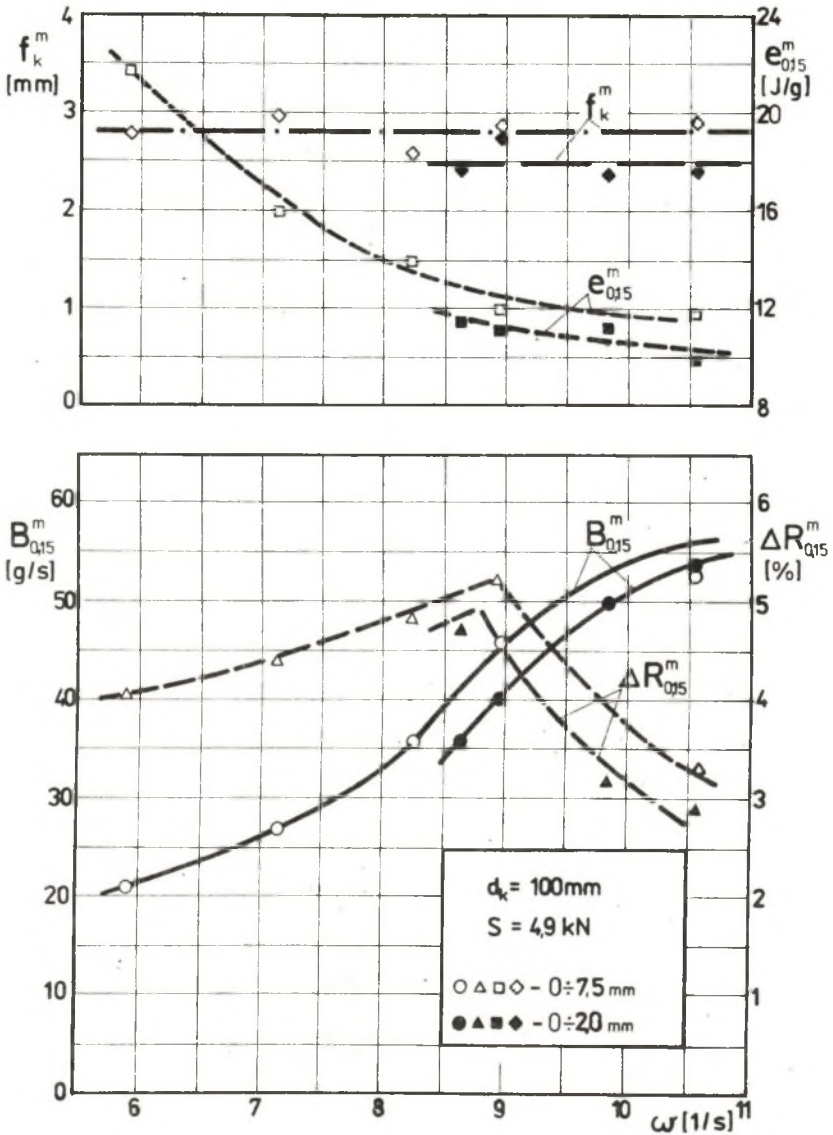
Obwiednia powstała przez połączenie punktów odpowiadających maksymalnym wydajnościom układu mielącego przy różnych przepustowościach granicznych tworzy charakterystyki uniwersalne  $B_{0,15}^m = f(B_m^m)$  i  $\Delta R_{0,15}^m = f(B_m^m)$  (rys. 5). Podobnie wartości wydajności maksymalnych i odpowiadających im efektów rozdrabniania (w punktach maksimum wydajności) dają charakterystyki uniwersalne  $B_{0,15}^m = f(\omega)$  i  $\Delta R_{0,15}^m = f(\omega)$ . Charakterystyki pozostałe, tj.  $e_{0,15}^m = f(\omega)$  i  $f_{0,15}^m = f(\omega)$ , wykonuje się w analogiczny sposób.

Na rys. 6 naniesiono charakterystyki uniwersalne jako funkcje prędkości kątowych dla obydwu stosowanych w badaniach modelowych klas ziarnowych węgla (punkty zaczernione - klasa 0-2 mm, punkty nie zaczernione - klasa 0-7,5 mm). Z porównania charakterystyk (rys. 6) wynika, że różnice między nimi są niewielkie. Uzasadnia to tym samym zastosowanie w badaniach modelowych przemiału na stanowisku doświadczalnym klasy ziarnowej 0-7,5 mm, co ma



Rys. 5. Charakterystyki uniwersalne układu mielącego 10-kulowego jako funkcja jego obciążenia  
 Fig. 5. Universal characteristics of 10-ball grinding system as a function of its loading





Rys. 6. Charakterystyki uniwersalne układu mielącego 10-kulowego jako funkcja jego prędkości kątowej

Fig. 6. Universal characteristics of 10-ball grinding system as a function of its angular velocity

znaczenie praktyczne w związku ze znacznie mniejszym nakładem pracy potrzebnym na jej przygotowanie.

### 2.2.1. Zależność efektu mielenia i grubości warstwy od prędkości kątowej

Z rys. 6 wynika, że efekt mielenia odpowiadający wydajności maksymalnej nieznacznie rośnie ze wzrostem prędkości kątowej, a przy pewnej wartości  $\omega_{gr}$  występuje jego nagłe załamanie. Ponieważ grubość granicznej warstwy węgla pod kulami mielącymi nie zależy od prędkości kątowej (krzywa  $f_{0,15}^m$   $f(\omega)$ ), zmiana wartości  $\Delta R_{0,15}^m$  wynika, jak należy sądzić, ze zmiany stosunku średniej prędkości promieniowej ruchu mieliwa po bieżni pierścienia miażdżącego do obwodowej prędkości kul. Wprowadzając pojęcie krotności mielenia  $k$  jako stosunku prędkości kul do prędkości promieniowej mieliwa na efektywnej części wyżłobienia (lub stosunku odpowiednich czasów) można ułatwić analizę zjawiska. Według [1] proces mielenia powinien zachodzić przy  $k = 1$ . Z fizycznego punktu widzenia oznacza to, że każda cząstka węgla zostanie zmiażdżona jednokrotnie w czasie jej przechodzenia po wyżłobieniu. Nagły spadek efektu mielenia po przekroczeniu pewnej prędkości kątowej świadczy o tym, że pewna część mieliwa nie bierze udziału w rozdrabnianiu ( $k < 1$ ). Spostrzeżenie to może być pomocne przy analizie pracy wentylowanego układu mielącego, gdzie chcąc uzyskać wzrost wydajności drogą zwiększenia prędkości kątowej należy liczyć się z wystąpieniem wzrostu oporów przetrzawiania przez młyn spowodowanych zmniejszeniem się efektu rozdrabniania (a więc wzrostem cyrkulacji mieliwa w komorze przemiałowej młyn).

### 2.2.2. Zależność wydajności i jednostkowego zużycia energii od prędkości kątowej

Na podstawie przebiegu charakterystyki uniwersalnej  $B_{0,15}^m = f(\omega)$  można stwierdzić, że wydajność układu mielącego rośnie wraz ze wzrostem prędkości pierścienia miażdżącego. Największy przyrost występuje w zakresie  $\omega = 7,5-9,5$  1/s, po czym przyrost ten staje się wolniejszy. Odchylenie charakterystyki wywołane jest nagłym zmniejszeniem się wartości efektu rozdrabniania dla  $\omega > 9$  1/s.

Jednostkowe zużycie energii na przemiał maleje ze wzrostem prędkości kątowej układu mielącego, wykazując w zakresie największych prędkości tendencję do stabilizacji. Analizując zjawisko od strony składu granulometrycznego nowo powstałego pyłu klasy ziarnowej 0-0,15 mm można stwierdzić, że przy małych prędkościach mielenia pył ten charakteryzuje się "nadmiernym" rozdrobnieniem w zakresie ziarn najdrobniejszych w porównaniu z pyłem produkowanym przy wyższych prędkościach układu mielącego. Jest to jedna z przyczyn wyższego jednostkowego zużycia energii na uzyskanie pyłu przy niskich prędkościach kątowych.

## 3. WNIOSKI

1. Wydajność pierścieniowo-kulowego układu mielącego rośnie wraz z prędkością kątową do pewnej granicy, po czym wykazuje tendencję do stabilizacji. Zarówno dla klasy ziarnowej węgla 0-2 mm, jak i dla 0-7,5 mm charakterystyki pracy układu mają podobny przebieg, różniąc się nieznacznie poziomem wartości.

2. Jednostkowe zużycie energii na przemiał spada wraz ze wzrostem prędkości kątowej, osiągając przy pewnej prędkości granicznej ( $\omega_{gr}$ ) wartość stałą.

3. Grubość warstwy mielwi pod kulami przy zadanej prędkości kątowej rośnie wraz z obciążeniem układu aż do osiągnięcia pewnej wartości granicznej, po czym stabilizuje się (strumień mielwi odpowiadający punktowi załamania charakterystyki nazwano przepustowością graniczną). W badanym zakresie  $\omega$  maksymalna grubość warstwy ( $f_k^m$ ) praktycznie nie zależy od prędkości kątowej.

4. Efekt mielenia  $\Delta R_{0,15}^m$  określony jako przyrost masy pyłu klasy ziarnowej 0-15 mm i odpowiadający maksymalnej wydajności przy danej prędkości kątowej nieznacznie rośnie ze wzrostem prędkości, a po przekroczeniu przez prędkość wartości  $\omega_{gr}$  jego wartość ulega dość gwałtownemu spadkowi.

5. Uzyskane wyniki badań mogą być wykorzystane do analizy zjawisk zachodzących w młynie przemysłowym, a także będą podstawą do opracowania matematycznego modelu procesu przemiału w pierścieniowo-kulowym układzie mielącym.

## LITERATURA

1. Romadin V.P.: Pyleprigotowlenie. "Gosenergoizdat". Moskwa - Leningrad 1953.
2. Czepiel J., Mroczek K.: Opracowanie modelu fizycznego procesu przemiału węgla w niewentylowanym pierścieniowo-kulowym układzie mielącym w oparciu o badania na instalacji doświadczalnej. Prace Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych (nie publikowane). Gliwice 1986.
3. Czepiel J., Mroczek K.: Badania wpływu granulacji węgla na wydajność i zużycie energii w niewentylowanym pierścieniowo-kulowym układzie mielącym o różnej liczbie i średnicy kul (nie publikowane). Gliwice 1987.
4. Czepiel J., Mroczek K.: Badania modelowe układu mielącego młyna pierścieniowo-kulowego. I. Przyjęte założenia, opis stanowiska doświadczalnego, metodyka badań. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka z. 104, Gliwice 1988.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Władysław Gajewski

Wpłynęło do redakcji w marcu 1988 r.

МОДЕЛЬНОЕ ИСПЫТАНИЕ РАЗМОЛЬНОЙ СИСТЕМЫ  
СРЕДНЕХОДНОЙ КОЛЬЦЕВО-ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Часть II. Влияние угловой скорости размольной системы на её  
производительность и расход энергии на размол

Р е з ю м е

Представляются результаты измерений влияния угловой скорости модельной кольцево-шаровой размольной системы на её производительность и расход энергии на размол каменного угля для двух его марок, отличающихся гранулометрическим составом. Поставлены на обсуждение полученные результаты, их интерпретация с физической точки зрения; сделаны выводы. Установлено, что производительность системы повышается приблизительно пропорционально угловой скорости, но только до определённого предела, после чего она стабилизируется на постоянном уровне.

THE INFLUENCE OF THE GRINDING SYSTEM ANGULAR VELOCITY  
ON ITS THROUGHPUT AND ENERGY CONSUMPTION FOR MILLING

Part II.

S u m m a r y

The results of measurements of the influence of the angular velocity of ring-ball model grinding system on its throughput and energy consumption for bituminous coal grinding for two types of coal differing in grain composition have been shown. The obtained results have been discussed, interpreted and conclusions have been drawn. It has been stated that the throughput increases approximately proportionally together with the growth of angular velocity to a certain limit and afterwards shows the tendency to stabilization.