ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria: ENERGETYKA z. 121 Nr kol. 1261

Kazimierz MROCZEK
Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechnika Śląska

WPŁYW PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ I NACISKU ELEMENTÓW MIELĄCYCH NA PRACĘ MŁYNA PIERŚCIENIOWO-KULOWEGO

Streszczenie. Przedstawiono zarys metod doboru optymalnej prędkości kątowej młynów pierścieniowo–kulowych. Porównano wyniki obliczeń dla typowej geometrii pierścienia miażdżącego i wyznaczonych współczynników tarcia. Omówiono współzależnosć optymalna prędkość – nacisk elementów mielących. Przedstawiono wyniki pomiarów wpływu prędkości mielenia i nacisku na pracę młyna przemysłowego.

THE INFLUENCE OF THE ANGULAR VELOCITY AND THE PRESSURE OF THE MILLING ELEMENTS ON THE WORKS OF THE RING–BALL MILL

Summary. The methods of selecting the angular velocity of the ring–balls mills has been described. The numerical results with thypical geometry of the crushing ring and determined coefficients of friction has been compared. It was shown that exists a correlation between the optimum velocity and the balls pressure. The results of measurements of the influence of milling rate and the pressure on the working performance of industrial mill have been presented.

EINFLUß DER WINKELGESCHWINDIGKEIT UND DES MAHLDRUCKES DER MAHLELEMENTE AUF DEN BETRIEB DER KUGELRINGMÜHLEN

Zussammenfassung. Eine Methode zur Bewertung der optimalen Winkelgeschwindigkeit von Kugelringmühlen wurde dargestellt. Ein Vergleich von Untersuchungsergebnisse, für eine typische Mahlringgeometrie, bei festgesetzten Reibungskoeffizienten der Kohle wurde durchgeführt. Der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und dem Mahldruck als auch die Messungen des

Einflußes der Mahlgeschwindigkeit und des Mahldruckes auf den Betrieb einer Industriemühle wurden gezeit.

WSTĘP

Niskoemisyjne spalanie, jakie wprowadza się w komorach paleniskowych kotłów energetycznych, z reguły wymaga obniżenia granulacji pyłu do palników. Bezpośrednio wiąże się to ze spadkiem maksymalnej wydajności młyna, której towarzyszy wzrost oporów przepływu, zużycia energii na przemiał i obniżenie trwałości elementów. Z tych powodów istnieje problem właściwego doboru cech geometrycznych komory przemiałowej, prędkości kątowej i nacisku elementów mielących w celu intensyfikacji i optymalizacji procesu przemiału. Problematyka ta jest przedmiotem badań na stanowisku doświadczalnym z młynem średniobieżnym, prowadzonych w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych. Osiągane wyniki są podstawą wykonywania ukierunkowanych pomiarów, a następnie doskonalenia konstrukcji młynów przemysłowych.

Wartość optymalnej prędkości mielenia młynów pierścieniowo–kulowych nie jest jednoznacznie określona. Występują duże różnice w jej ocenie na podstawie dostępnych danych literaturowych. Praktycznie stosowane prędkości w krajowych młynach pierścieniowo–kulowych są znacznie wyższe niż pracujące np. na podobnej zasadzie młyny typu MPS. Celem zbadania tego zagadnienia, we współpracy z FPM w Mikołowie, przeprowadzono pomiary młyna EM–70 z nominalną i obniżoną prędkością obrotową. Zweryfikowano także wpływ nacisku na efektywność procesu przemiału.

2. OPTYMALNA PRĘDKOŚĆ MIELENIA

W literaturze jest kilka metod wyznaczania optymalnej prędkości kątowej młyna pierścieniowo–kulowego. W celu porównania tych metod przyjęto takie same współczynniki tarcia, których wartości mają wpływ na obliczone wyniki.

Prędkość kątowa pierścieniowo–kulowego układu mielącego (ω) [1] jest wyznaczana na podstawie swobodnego ruchu cząstki węgla po obrotowym stole, z uwzględnieniem warunku równości strumieni węgla mielonego przez kule i węgla dostającego się na bieżnię z kierunku promieniowego. Wprowadzając bezwymiarową prędkość pierścienia – liczbę Frouda ($Fr = \omega^2 r/g$), optymalna prędkość pierścienia, odniesiona do promienia podziałowego bieżni r_p – rys. 1, wyniesie:

$$Fr_p = \frac{4\,\mu_b}{(4 - \alpha_B - \alpha_A)} \tag{1}$$

$$\mu_b = \ln \frac{\cos(\alpha_B - \psi)}{\cos(\alpha_A + \psi)} \tag{2}$$

gdzie:

α_A, α_B – odpowiednio wewnętrzny i zewnętrzny kąt opasania kuli,

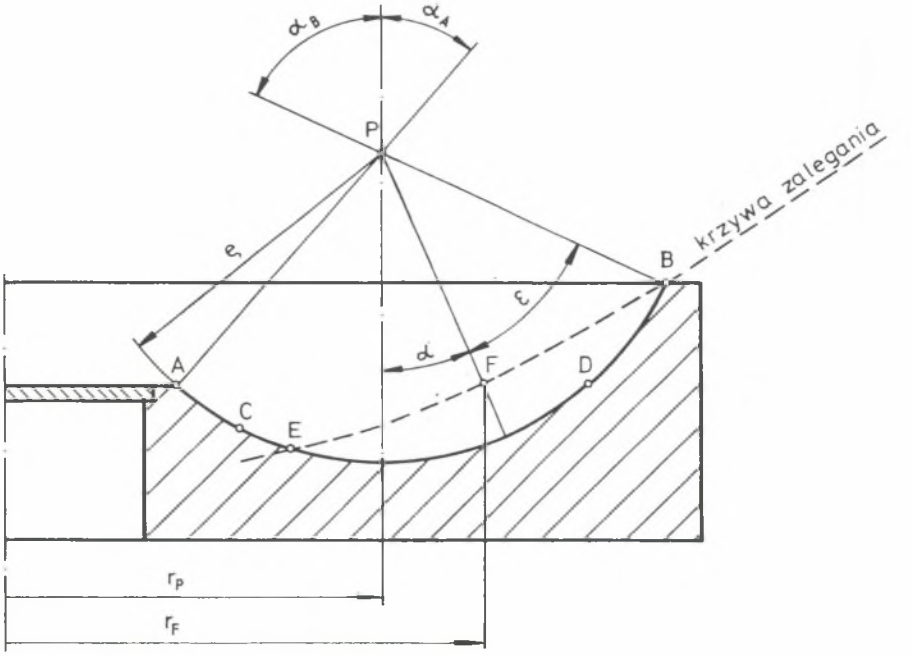
ψ – kąt tarcia węgla po stali.

Współczynnik μ_b (2) ma charakter uogólnionej liczby tarcia, uwzględniającej kształt bieżni pierścienia.

Dla danych 10–kulowego układu mielącego o bieżni symetrycznej, $\alpha_A = \alpha_B = 0{,}785(45°)$ i kąta tarcia $\psi = 0{,}423$ (24°), optymalna liczba $Fr_p = 1{,}59$.

W publikacjach [6, 8, 9] postawiono hipotezę, że mielenie nie zachodzi na pełnym łuku opasania kuli, lecz na jego części. Podstawą do wyznaczenia optymalnej prędkości mielenia [6] (nie analizowano zmienności strumienia mielonego przez kule) jest teoretyczna krzywa zalegania węgla na bieżni – rys. 1.

Lokalne nachylenie powierzchni stożkowej wyznacza się z warunku równowagi sil działających na element masy znajdujący się na powierzchni zalega-



Rys. 1. Czynny łuk bieżni w modelowaniu mielenia

Fig. 1. Active raceway arc in milling simulation

nia. Mieleniu podlega węgiel zawarty między krzywą zalegania a bieżnią, który porusza się z prędkością pierścienia. Upraszczająco przyjmując, że linia EB jest prostą, można wyznaczyć maksymalną grubość warstwy zalegającej na bieżni, $f^m = \rho(1 - \cos \varepsilon)$. Równocześnie maksymalna wysokość warstwy wciąganej pod kulę, na podstawie eksperymentalnych danych [9], $f^m = 0{,}10\,\rho$ Porównując obie wielkości oblicza się wartość średniego kąta nachylenia $\varepsilon = 0{,}45$ (26°). Uwzględniając, że $\alpha = \alpha_B - \varepsilon$ i podstawiając do równania powierzchni zalegania, optymalną bezwymiarową prędkość układu mielącego określa wzór:

$$Fr_F = \frac{tg\,(\alpha_B - \varepsilon) + \mu_w}{1 - \mu_w\, tg\,(\alpha_B - \varepsilon)} \tag{3}$$

gdzie:

$\mu_w = tg\,\psi_w$ – wewnętrzny współczynnik tarcia węgla.

Należy zaznaczyć, że optymalna liczba Frouda dotyczy promienia $r_F = r_p + (\rho - f^m) \sin(\alpha_B - \varepsilon)$ – rys. 1. Przykładowo, dla danych 10–kulowego układu mielącego o bieżni symetrycznej i wewnętrznego współczynnika tarcia węgla $\mu_w = 0{,}75$ optymalna liczba $Fr_F = 1{,}47$. Odpowiadająca wartość bezwymiarowej prędkości, odniesiona do promienia podziałowego bieżni r_p, wyniesie $Fr_p = 1{,}34$.

W pracy [8] przedstawiono tezę, że mielenie także zachodzi na pewnej części łuku bieżni CD – rys. 1. Czynny łuk bieżni jest określony na podstawie modelu ruchu cząstki węgla w segmentach międzykulowych bieżni. Początkiem łuku mielenia (początek wciągania) jest miejsce upadku cząstki węgla na bieżnię (pkt. C). Końcowy punkt czynnego łuku (pkt. D) wyznaczono z maksymalnego przemieszczenia się cząstki(wchodzącej na bieżnię z kierunku promieniowego) przed wejściem pod kolejną kulę. Przy tym założeniu ulega rozdrabnianiu tylko „świeży" węgiel napływający na bieżnię. W podobny sposób można wyznaczyć optymalną prędkość mielenia na podstawie modelu przepływu warstwy węgla [9]. Początkowy punkt czynnego łuku bieżni w tym opisie wynika z założenia, aby obwodowa prędkość strugi węgla była większa od prędkości kul. Końcowy punkt określa zewnętrzny kąt opasania kuli. W obu rozpatrywanych modelach początkowy punkt wciągania węgla pod kule jest uzależniony od warunków napływu mieliwa na bieżnię (wartości i kierunku prędkości elementu w pkt. A), na które ma wpływ geometryczne ukształtowanie wewnętrznej części obrotowego stołu młyna. Optymalna prędkość mielenia, przy której wystąpi maksymalna wydajność 10–kulowego symetrycznego układu mielącego, wynosi od $Fr_p = 1{,}4$ (dla stołu płaskiego [9]) do $Fr_p = 2{,}2$ (dla stołu wgłębionego [8, 9]).

Przytoczone modele procesu przemiału są zbudowane na głównym założeniu, że mieliwo porusza się pod wpływem sił bezwładności i tarcia. W rzeczy-

wistości przemieszczanie się cząstek następuje częściowo pod wpływem bezwładności, a częściowo drogą wyciskania spod kul. O udziale wymienionych czynników decydować będą wartości Fr oraz średniego kąta nachylenia bieżni. Przy niskich prędkościach mielenia i dużych pochyleniach bieżni (np. w młynach typu BM) decydujący będzie mechanizm wyciskania. Pomimo tych niedoskonałości mogą one być przydatne przy wyznaczaniu kierunków zmian parametrów konstrukcyjnych pierścieniowo–kulowych układów mielących celem poprawy efektywności przemiału. Jak wynika z powyższego przeglądu, występuje pewna rozbieżność w ocenie optymalnej prędkości mielenia, a w większości sposobów obliczeń bezwymiarowa prędkość pierścienia miażdżącego przybiera niższą wartość (Fr = 1,34 – 1,59) w porównaniu do przyjętej w krajowych młynach węglowych (Fr_p = 1,9 – 2,1).

3. NACISK ELEMENTÓW MIELĄCYCH

W młynach średniobieżnych istotnym parametrem konstrukcyjnym jest wartość jednostkowego nacisku na powierzchnię miażdżenia, określonego przez stosunek całkowitej siły do pola przekroju poprzecznego elementów mielących. Z punktu widzenia procesu rozdrabniania bardziej właściwa jest formuła (4), uwzględniająca długość łuku bieżni.

$$s_f = \frac{S}{2z\,\rho\,l} \tag{4}$$

gdzie:

z – liczba kul,

$l = \alpha\,\rho$ – długość łuku miażdżenia.

Przy kącie opasania kuli $\alpha = \pi/2$ obie formuły są równoważne.

Badania doświadczalne [4, 9] wykazują liniowy wzrost wydajności młyna wraz z powiększaniem nacisku do pewnej granicy, po czym następuje jej powolna stabilizacja. Graniczne wartości jednostkowego nacisku mogą osiągać wartości ok. 180 – 200 kPa. Ponieważ są one zależne od własności przemiałowych węgla, dlatego powinny być wyznaczone doświadczalnie. W krajowych młynach pierścieniowo–kulowych stosowane są naciski nominalne $s_f \approx$ 125 kPa. Są one niższe od wartości granicznych.

Optymalna prędkość mielenia jest prawdopodobnie związana z wartością jednostkowego nacisku. Współzależność tę można zinterpretować za pomocą opisu procesu przemiału, w którym rzeczywisty łuk mielenia zmienia się wraz z prędkością kątową pierścienia. W przypadku zastosowania dużych prędkości mielenia, przy których czynny łuk bieżni jest relatywnie mały, a jednostkowe naciski osiągają wartości graniczne, dalsze ich zwiększanie nie powoduje

już wzrostu wydajności młyna. Przy obniżeniu prędkości kątowej, ze względu na wydłużanie się czynnego łuku miażdżenia, jednostkowe naciski spadają poniżej wartości granicznych. W tych warunkach należałoby je podnieść do poziomu granicznego uzyskując przyrost wydajności młyna. Tezę tę potwierdzają badania na stanowisku doświadczalnym [7], gdzie powiększenie nacisku spowodowało obniżenie wartości optymalnej Fr_p, a funkcja maksymalnej wydajności stała się słabo zależna od prędkości kątowej. Stąd można wnioskować, że zadanej wartości Fr powinien odpowiadać określony nacisk elementów mielących ze względu na kryterium największej efektywności produkcji pyłu w układzie mielącym.

4. WYNIKI BADAŃ PRZEMYSŁOWYCH

Omówione wyniki teoretyczne i badania na stanowiskach doświadczalnych zostały cząstkowo zweryfikowane w młynie EM–70. Układ mielący tego młyna posiada 9 kul o średnicy 0.54 m, współpracujących z symetrycznym pierścieniem miażdżącym o całkowitym kącie opasania $\alpha = \pi/2$. Nacisk elementów mielących jest realizowany za pomocą sprężynowych zespołów dociskowych. Podczas pomiarów tego młyna zastosowano trzy wartości nacisków: s_f = 104, 125 (nominalny) i 156 kPa oraz dwie prędkości kątowej ω = 5,08 (nominalna) i 3,96 s^{-1}. Odpowiada to zmianie bezwymiarowej prędkości z Fr_p = 2,07 na Fr_p = 1,26.

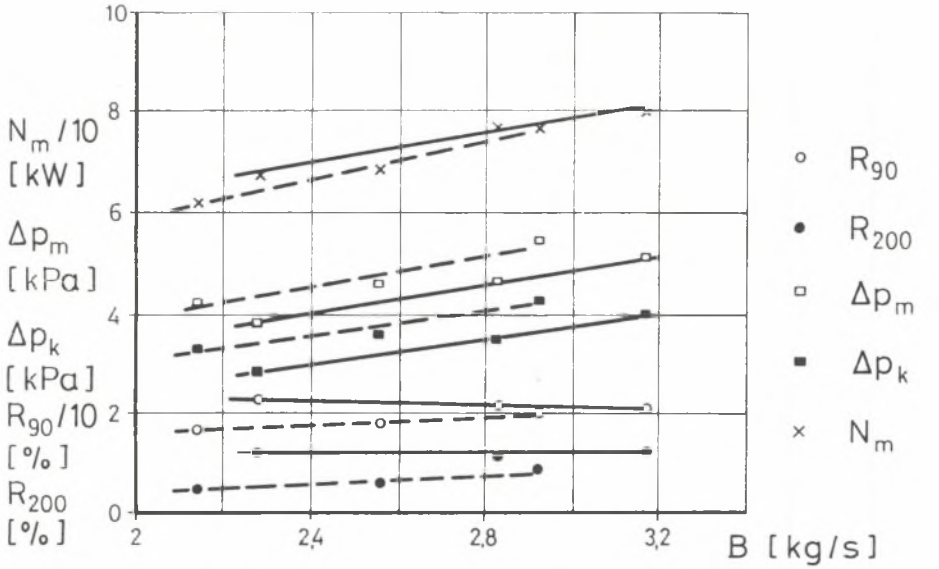
Młyn posiadał zabudowany odsiewacz dostosowany do drobnego przemiału, wymaganego dla palników niskoemisyjnych. W tych odsiewaczach granulacja produkowanego pyłu słabo zależy od strumienia czynnika susząco–transportującego. Zastosowane ustawienie łopatek regulacyjnych odsiewacza na $\alpha = 35^o$ umożliwiało osiągnięcie granulacji pyłu, określonej pozostałością na sicie 90 μm – $R_{90} \approx 20\%$. Dla tego poziomu jakości przemiału dokonano porównania maksymalnych wydajności młyna.

Maksymalna obciążalność młyna B^m jest funkcją (oprócz cech konstrukcyjnych układu mielącego) ustawienia elementów regulacyjnych odsiewacza (np. kąta ustawienia łopatek) i własności przemiałowych węgla. Wartości te mogą być również ograniczone między innymi zbyt niskimi parametrami wentylatora młynowego.

4.1. **Wpływ prędkości kątowej**

Przebiegi podstawowych wielkości wynikowych pracy młyna w funkcji jego obciążenia dla nominalnej i obniżonej prędkości obrotowej pierścienia miażdżącego przedstawiono na rys. 2. Pomiary wykonano przy podwyższonym jednostkowym nacisku do s_f = 156 kPa. Przy nominalnej prędkości kątowej młyna (ω = 5,08 s^{-1}) osiągnięto maksymalną wydajność B^m = 3,17 kg/s (11,4 t/h, przy mieleniu węgla o własnościach: Q_i^r = 23,4 MJ/kg; A^r = 19,2%;

W_t^r = 8,0%; GrH = 49°H. Jakość przemiału, określona pozostałością na sicie 0,2 mm, wyniosła R = 1,3% (liczba polidyspersji pyłu n ≈ 1,30). W przypadku obniżenia prędkości do ω = 3,96 s^{-1}, maksymalna wydajność spadła do B^m = 2,92 kg/s (10,5 t/h), dla podobnej charakterystyki podawanego węgla. Należy zaznaczyć, że osiągnięte wydajności były ograniczone maksymalnym sprężem wentylatora młynowego, którego wartość nie pozwalała na osiągnięcie wymaganych wentylacji przy relatywnie wysokich oporach przepływu w instalacji.



Rys. 2. Wpływ prędkości kątowej na wyniki pracy młyna: L. ciągłe – ω_1 = 5,08 1/s, l. przerywane – ω_2 = 3,96 1/s

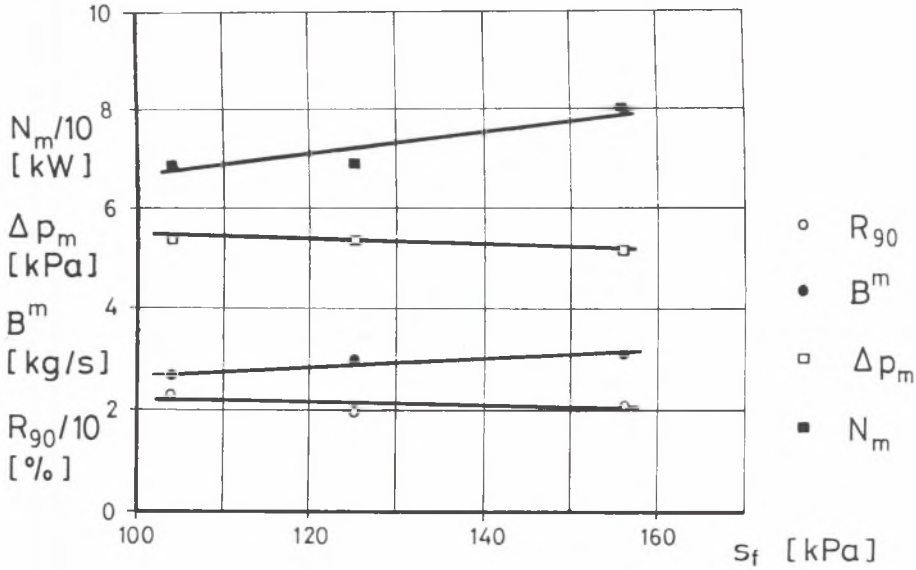
Fig. 2. The influence of the angular velocity on the mill work effects: Full l. – ω_1 = 5,08 1/s, broken l. – ω_2 = 3,96 1/s

Porównując wyniki badanych układów mielących, można stwierdzić, że w przypadku młyna z obniżoną prędkością obrotową jest produkowany pył drobniejszy, pomimo stosowania tych samych wentylacji i ustawień elementów regulacyjnych odsiewacza. Pozostałość na sicie 0,2 mm w pyle wyniosła R < 0,9, przy większej jego jednorodności (n ≈ 1,35). Można przypuszczać, że ma to związek z liczbą miażdżeń danej porcji węgla w czasie jej przechodzenia przez komorę mielenia (tzw. krotnością mielenia). W obszarze średnich wydajności silnik o mniejszej prędkości obrotowej pobiera niższą moc elektryczną (m.in. ze względu na zmniejszenie prądu biegu jałowego). Jednak z obciążeniem

pobierana moc narasta szybciej w stosunku do jej zmian dla silnika standardowego. Wynika to z faktu, że grubość warstwy pod kulami rośnie szybciej z obciążeniem wraz z obniżaniem prędkości kątowej [5], co bezpośrednio rzutuje na przebieg mocy silnika młyna.

4.2. **Wpływ nacisku**

Zwiększanie nacisku sprężyn, w granicach możliwości technicznych, powodowało liniowy wzrost maksymalnej wydajności młyna B^m – rys. 3. Przy niezmienionym ustawieniu łopatek regulacyjnych odsiewacza maksymalna wydajność młyna wzrosła z 2,72 kg/s (9,8 t/h) do 3,17 kg/s (11,4 t/h), przy zmianie jednostkowego nacisku s_f z 104 kPa na 156 kPa.



Rys. 3. Wpływ nacisku na wyniki pracy młyna

Fig. 3. The influence of the pressure on the mill work effects

W przypadku wystąpienia ograniczeń w pracy instalacji może to być prosta metoda zwiększenia wydajności lub zmniejszenia oporów przepływu w młynie. Należy się przy tym liczyć z pewnym wzrostem zużycia energii elektrycznej na przemiał i obniżeniem trwałości elementów mielących. Skuteczność tej metody zależeć będzie od własności mielonego węgla.

5. PODSUMOWANIE

Pomiary młyna wykazały, że przy utrzymaniu tego samego nacisku obniżenie prędkości mielenia o ok. 22% spowodowało spadek maksymalnej wydajności młyna jedynie o 8%. Towarzyszyło temu polepszenie jakości przemiału. Aby utrzymać maksymalną wydajność na niezmienionym poziomie, w przypadku obniżenia prędkości kątowej, należałoby odpowiednio zwiększyć nacisk elementów mielących. Osiągnięte wydajności były ograniczone maksymalnym sprężem wentylatora młynowego, którego wartość nie pozwalała na osiągnięcie wymaganych wentylacji.

W celu dokładnego wyznaczenia optymalnej prędkości mielenia należałoby przeprowadzić badania po zainstalowaniu silnika z regulowaną prędkością obrotową i wentylatora umożliwiającego uzyskanie zakładanych wentylacji przy wysokich obciążeniach młyna. Wartość prędkości kątowej ma wpływ na poziom drgań i trwałość podzespołów młyna. Można przypuszczać, że przy jej obniżeniu oprócz zmniejszenia drgań ulegnie wydłużeniu czas pracy elementów pomimo zwiększenia nacisku. Słuszność tej tezy powinny potwierdzić doświadczenia eksploatacyjne.

Na podstawie danych literaturowych i badań doświadczalnych właściwy poziom nacisku elementów mielących jest zależny od własności przemiałowych węgla. W niektórych instalacjach przygotowania pyłu, w przypadku ograniczeń zdolności przemiałowej, zwiększenie nacisku może być prostą metodą podwyższenia maksymalnej wydajności młyna. Wcześniej należałoby wykonać odpowiedni test sprawdzający.

LITERATURA

[1] Romadin W.P.: Pyleprigotowlenije. Gosenergoizdat, Moskwa – Leningrad 1953.

[2] Sprawozdanie z pomiarów młynów EM–70 o typowej i zwiększonej prędkości obrotowej zespołu mielącego. Opracowanie ZPBE „Energopomiar". Gliwice 1980.

[3] Letin L.A., Roddatis K.F.: Srednechodnye i tichochodnye mielnicy. Energoizdat, Moskwa 1981.

[4] Osokin W.P.: Srawnitelnoje stendowyje ispytanija srednechodnych mielnic razlicznoj konstrukcji. Elektriczeskije stancji Nr 6, 1984.

[5] Czepiel J., Mroczek K.: Badania modelowe wpływu prędkości kątowej i średnicy kul na wydajność młyna pierścieniowo–kulowego. Materiały II konferencji naukowo–technicznej „Budowa i eksploatacja młynów do przemiału węgla". Rydzyna 1988.

[6] Osokin W.P., Uszakow S.G., Pesnochorowa O.A.: Optimalnaja skorost wraszczenija stola srednechodnych mielnic. Energomaszinostroenije Nr 6, 1989.
[7] Czepiel J., Mroczek K.: Badania modelowe młyna 7M115. Opracowanie Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej (nie publikowane). Gliwice 1989.
[8] Czepiel J.: Wpływ prędkości kątowej układu mielącego na wydajność młyna pierścieniowo–kulowego. Praca doktorska. Gliwice 1990.
[9] Mroczek K.: Analiza wpływu geometrii układu mielącego na wydajność młyna pierścieniowo–kulowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej s. Energetyka z. 113. Gliwice 1990.
[10] Czepiel J. Mroczek K.: Procesy przygotowania węgla w paleniskach kotłowych w aspekcie ochrony środowiska. Opracowanie Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej (nie publikowane). Gliwice 1991.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Władysław GAJEWSKI

Wpłynęło do Redakcji 18.08.1994 r.

Abstract

The comparison or the methods of selecting the angular velocity of the crushing ring ptoved that, with determined coal coefficients of friction, the optimum milling speed generally acquires lower values than the one used in polish ring–ball mills. On the basis of experimental research and theoretical data it was shown that there exists a correlation between the optimum velocity and the milling elements pressure. The analysis results were verified in an EM–70 mill (9 balls, 530 mm in diameter). It was observed that a 22% decrease in the angular velocity in proportion to the nominal speed causes only an 8% fall of the mill output. At the same time, there was obserwed the decreasing of dust granulation. For the coal used, the change uf unitary pressure (the ratio of total power to the balls section area) from 103 into 156 kPa causes a linear increase on mill output. In case of angular velocity decrease, to maintain the maximum output at an unchanged level, it is necessary to increase the balls pressure. It may be surmised that, apart from decrease in vibration, the elements working time will be longer despite increase in pressure.