

kruszywa mineralne, hałas, kruszarki

Agnieszka SARAMAK¹
Zdzisław NAZIEMIEC²
Daniel SARAMAK³

ANALIZA POZIOMU HAŁASU WYBRANYCH URZĄDZEŃ ROZDRABNIAJĄCYCH

W technologicznych układach przeróbki surowców mineralnych, a zwłaszcza kruszyw, rozdrabnianie odgrywa kluczową rolę, zapewniając uzyskanie produktu o odpowiedniej granulacji. Operacje kruszenia są także energochłonne oraz charakteryzują się dużą uciążliwością dla środowiska, chociażby ze względu na znaczną emisję zapylenia oraz generowany hałas. W artykule poruszony został temat dotyczący hałasu powstającego podczas pracy kruszarek. Analizie zostały poddane wybrane typy kruszarek, zmierzono poziom hałasu oraz dokonano powiązania uzyskanych wartości ze skutecznością technologiczną urządzeń, określoną jako uzyskany stopień rozdrobnienia i wydajność. Wyniki badań pokazują, że różne urządzenia rozdrabniające charakteryzują się pod tym względem różną uciążliwością dla środowiska.

1. WSTĘP

Jedną z cech charakterystycznych procesów produkcji kruszyw mineralnych jest ich wysoka energochłonność, na co głównie wpływa szereg operacji rozdrabniania, które są niezbędne do uzyskania produktu o określonym składzie ziarnowym i spełniającym zadane wymagania jakościowe. Generalnie operacje kruszenia odznaczają się wysokim stopniem uciążliwości dla środowiska i człowieka ze względu na:

^{1,3} AGH w Krakowie, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Katedra Inżynierii Środowiska i Przeróbki Surowców, saramak@agh.edu.pl, dsaramak@agh.edu.pl

² Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddz. Kraków, z.naziemiec@icimb.pl

- dużą ilość zużywanej energii elektrycznej i związaną z tym emisję dwutlenku węgla do atmosfery; CO₂ jest jednym z produktów ubocznych procesu wytwarzania energii,
- zapylenie powstające podczas procesów kruszenia i mielenia i jego emisję do atmosfery; w wyniku tego obniżona jest jakość powietrza atmosferycznego, co skutkuje pogorszeniem warunków życia ludzi w pobliżu kopalń i zakładów produkcji kruszyw,
- emisję hałasu,
- zużywanie się części roboczych kruszarek, wymuszające produkcję nowych części zapasowych (zaangażowanie branży hutniczej w proces produkcji).

Zanieczyszczenie powietrza może powodować u ludzi choroby układu krążenia i oddechowego, a także wpływa negatywnie na jakość wód i gleb. Nadmierny hałas z kolei może prowadzić do wysokiego poziomu stresu, zaburzeń snu oraz chorób układu krążenia, szczególnie w przypadku długotrwałego oddziaływania na organizm ludzki. W artykule skupiono się na określeniu poziomu emisji hałasu przez wybrane urządzenia rozdrabniające. Autorzy zdają sobie sprawę, że hałas nie jest najważniejszym czynnikiem związanym z negatywnym oddziaływaniem przemysłu kruszywowego na środowisko i człowieka, jednakże w porównaniu z pozostałymi problemami, hałas jest stosunkowo rzadziej tematem publikacji naukowych, dlatego skupiono się na tej kwestii. Podjęto także próbę powiązania emisji hałasu wybranych kruszarek w odniesieniu do ich efektywności technologicznej, mierzonej stopniem rozdrobnienia oraz ekonomicznej – mierzonej energochłonnością.

2. PROBLEM HAŁASU I METODOLOGIA

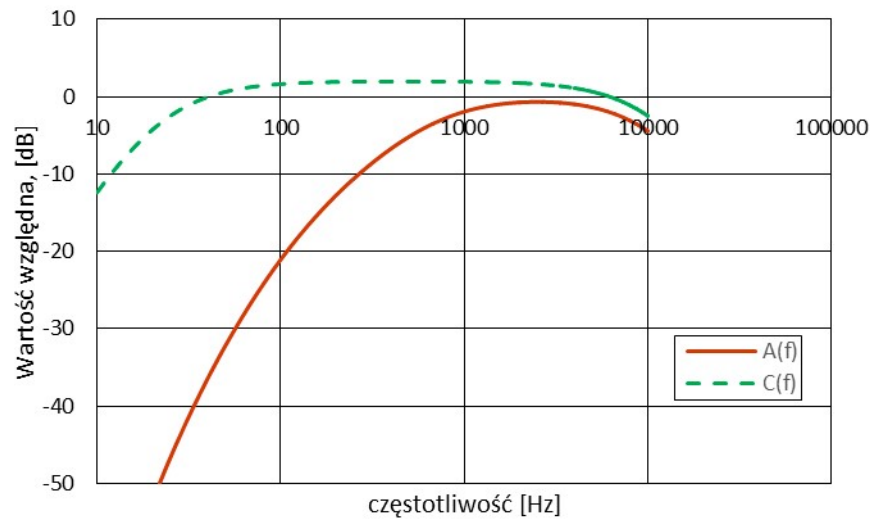
Hałas można zdefiniować jako niepożądany, nieprzyjemny, dokuczliwy lub szkodliwy dźwięk, powodowany przez działalność człowieka, w tym hałas komunikacyjny, przemysłowy i komunalny, o częstotliwości od 16 Hz do 16 000 Hz. Głównym aktem prawnym odnoszącym się do problemu hałasu w Europie i walki z nim jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Europy (tzw. Dyrektywa Hałasu) nr 2002/49/WE z dnia 25 czerwca 2002 roku *dotycząca oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku*. Określone w niej zostały wskaźniki hałasu, metody ich oceny oraz ich stosowanie. W ustawodawstwie krajowym kluczowa jest ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. *Prawo ochrony środowiska*, gdzie zawarte są zagadnienia związane z ochroną przed hałasem. Normy hałasu zostały zawarte w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. *ws. dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku*, a kolejnym istotnym aktem jest Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4 listopada 2008 r. *ws. wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji oraz pomiarów ilości pobranej wody*.

Hałas jest dość powszechnym czynnikiem, na który narażone są współczesne społeczeństwa. Wyniki różnych badań wskazują, że na nadmierny hałas narażony jest średnio co trzeci Polak. Wyniki badań wskazują również, że największe zagrożenie stanowi hałas komunikacyjny, a następnie przemysłowy. Około 53% wszystkich przekroczeń hałasu przemysłowego stanowią przekroczenia do 5 dB, natomiast 6% stanowią przekroczenia powyżej 15 dB. Jednakże średnio ponad 50% zakładów przemysłowych w Polsce wykazuje przekroczenia dopuszczalnych poziomów dźwięku do atmosfery i wartość ta w ciągu ostatnich 20 lat utrzymuje się na podobnym poziomie (BAiD 2012; BMS 2011; IOS 2004)). Jednak ucho ludzkie reaguje w różny sposób na dźwięki o różnych częstotliwościach, dlatego w metodologii pomiaru poziomu hałasu wprowadzono filtry (krzywe) korekcyjne, pozwalające skorygować poziom dźwięku do poziomu równoważnego. Najczęściej stosowane krzywe częstotliwościowe to A i C. Funkcyjne wzory dla dowolnego poziomu częstotliwości f [Hz] są następujące:

$$A(f) = 20 \log \left[\frac{f_4^2 \cdot f^4}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_2^2)^{1/2}(f^2 + f_3^2)^{1/2}(f^2 + f_4^2)} \right] - A_{1000}, [\text{dB}]$$

$$C(f) = 20 \log \left[\frac{f_4^2 \cdot f^4}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_4^2)} \right] - C_{1000}, [\text{dB}]$$
(1)

gdzie: f_1, f_2, f_3, f_4 – parametry,
 A_{1000}, C_{1000} – stałe normujące.



Rys. 1. Przebieg krzywych korekcyjnych A i C
 Fig. 1. Correction curves A and C type

Poziom hałasu emitowanego do środowiska, skorygowany o odpowiednią krzywą korekcyjną opisuje wzór

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^n t_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Ai}} \right), [\text{dB}] \quad (2)$$

gdzie:

T – całkowity czas pomiaru, [s],

t_i – przedział czasu T , [s],

L_{Ai} – zarejestrowany poziom dźwięku w czasie t_i , [dB].

Wyznaczoną wartość L_{Aeq} podaje się wraz z wartościami przedziałów niepewności rozszerzonej dla $k = 2$:

$$\left\{ L_{Aeq} - k \cdot t_{95} \cdot \frac{s}{\sqrt{n-1}}; L_{Aeq} + k \cdot t_{95} \cdot \frac{s}{\sqrt{n-1}} \right\} \quad (3)$$

gdzie:

s – odchylenie standardowe,

n – liczba pomiarów,

t_{95} – wartość rozkładu T-Studenta dla $n-1$ stopni swobody oraz poziomu ufności 95%.

Program badań obejmował emisję hałasu dla wybranych urządzeń rozdrabniających, pracujących w układach rozdrabniania surowców skalnych.

3. PROGRAM BADAŃ

Głównym celem badań była emisja hałasu dla wybranych urządzeń przemysłowych, rozdrabniających surowce mineralne. Przebadano kruszarkę stożkową, udarową szczękową oraz walcową. Dla każdego urządzenia zarejestrowano poziom ekwiwalentny emisji hałasu z uwzględnieniem tła. Pomiary zostały wykonane zgodnie z wymaganiami rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 4 listopada 2008 r. Z uwagi na fakt, że emisja hałasu z badanych urządzeń cechowała się bardzo małą zmiennością, przeprowadzono trzy pomiary, każdy przez 30 minut.

Tab. 1. Charakterystyka badanych urządzeń rozdrabniających
Tab. 1. Characteristics of crushers

Typ kruszarki	Stadium kruszenia	Moc [kW]	Wydajność [Mg/h]	Stopień rozdrobnienia S_{\max}
szczękowa	1	250	500	5,2
stożkowa	1	160	250	5,3
udarowa	2	75	120	2,4
młotkowa	2	50	30	7,5
walcowa	2	60	30	2,7

Wszystkie kruszarki pracowały przy kruszeniu wapienia zwięzłego. Kruszarka szczękowa C 160 i stożkowa 40.90 pracowały na pierwszym stopniu kruszenia, przyjmując nadawę z wyrobiska, po urabianiu robotami strzałowymi, a udarowa K 150, młotkowa 41.98 i walcowa 1000×630 na wtórnych stopniach kruszenia. Charakterystyki badanych kruszarek podano w tabeli 1.

Celem badań była rejestracja poziomu hałasu emitowanego bezpośrednio przez źródło (tj. dane urządzenie), dlatego punkt pomiarowy za każdym razem lokalizowany był w bezpośrednim sąsiedztwie kruszarki, tak aby maksymalnie ograniczyć hałas pochodzący z innych źródeł. Przyjęto umownie, że rejestrator umieszczony był w odległości 1 metra od urządzenia na wysokości komory roboczej urządzenia, będącej źródłem największego hałasu (Wasilewski i in. 2016). Dla każdego urządzenia rejestrowano także wydajność oraz uzyskiwany stopień rozdrobnienia, co było podstawą do wyznaczenia odpowiednich wskaźników. Tabela 1 przedstawia zestawienie kruszarek, które były badane w programie badawczym, natomiast warunki meteorologiczne panujące podczas pomiarów zaprezentowano w tabeli 2.

Tab. 2. Warunki meteorologiczne panujące podczas pomiarów
Tab. 2. Meteorological conditions during measurements

Parametr	Wartość
prędkość wiatru	bezwietrznie
temperatura otoczenia [°C]	2
wilgotność względna [%]	76
ciśnienie atmosferyczne [hPa]	1001
opady	brak

4. ANALIZA WYNIKÓW

Wyniki pomiaru hałasu dla każdej próbki oraz wyznaczone średnie poziomy emisji hałasu zostały przedstawione w tabeli 3, a w tabeli 4 – wyznaczone niepewności pomiarowe na podstawie wzoru (3), przy przyjęciu współczynnika rozszerzenia $k = 2$.

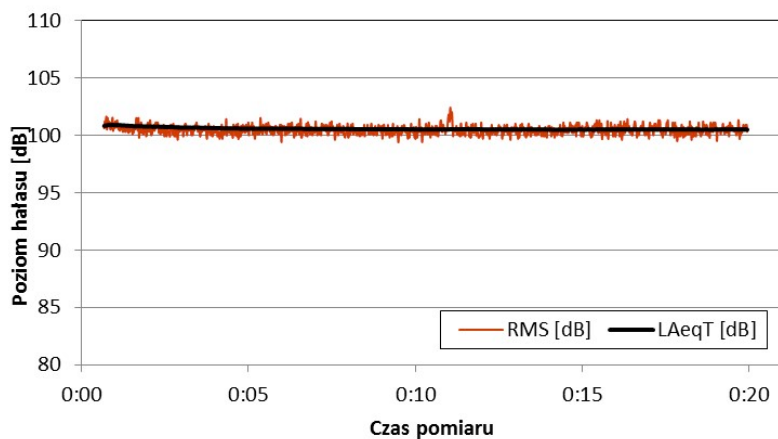
Tab. 3. Wyniki pomiarów emisji hałasu
Tab. 3. Results of noise emission

Typ kruszarki	Zmierzony poziom dźwięku [dB]			Poziom emisji hałasu L_{Aeq} dla urządzenia
	L_{A1}	L_{A2}	L_{A3}	
szczękowa	98,78	100,43	100,81	100,01
stożkowa	96,32	96,64	96,19	96,38
udarowa	83,59	83,84	83,82	83,75
młotkowa	87,51	87,47	87,33	87,44
walcowa	100,71	100,52	100,49	100,57

Tab. 4. Zestawienie wskaźników hałasu z uwzględnieniem niepewności pomiarowej
 Tab. 4. Noise emission with the measurement uncertainty

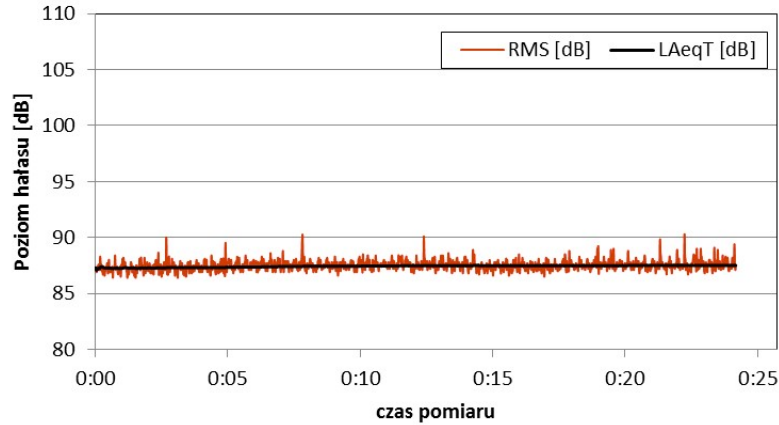
Typ kruszarki	Poziom emisji hałasu L_{Aeq} [dB]	$L_{Aeq}-U_{95}$ [dB]	$L_{Aeq}+U_{95}$ [dB]	Zmienność [dB]
szczękowa	100,01	94,64	105,37	5,36
stożkowa	96,38	95,23	97,53	1,15
udarowa	83,75	83,06	84,44	0,69
młotkowa	87,44	86,97	87,91	0,50
walcowa	100,57	99,98	101,17	0,59

Analizując wyniki zawarte w tabelach 3 i 4 można zauważyć, że najwyższe wartości poziomu hałasu otrzymano dla kruszarki szczękowej, a następnie dla walcowej. Najniższe poziomy hałasu zarejestrowano dla kruszarek udarowej i młotkowej. Wszystkie badane urządzenia, z wyjątkiem kruszarki szczękowej, charakteryzują się niewielką zmiennością poziomu emitowanego hałasu – od ok. 0,5 dB dla kruszarki młotkowej do 5,36 dB dla szczękowej. Zmienność powyżej 1 dB została również zarejestrowana dla kruszarki stożkowej. Wybrane przykłady zarejestrowanego poziomu dźwięku dla kruszarek walcowej, młotkowej i szczękowej przedstawiono na rysunkach 2–4.

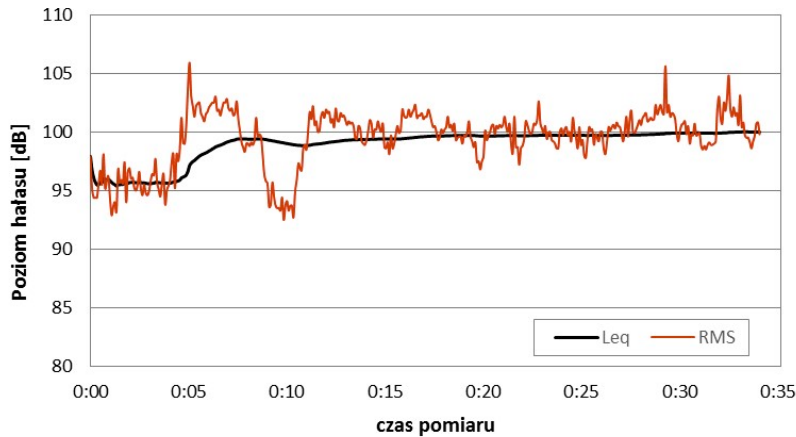


Rys. 2. Zarejestrowany poziom hałasu dla kruszarki walcowej
 Fig. 2. Noise level for roller crusher

Duża zmienność hałasu zarejestrowana dla kruszarki szczękowej (tab. 4, rys. 4) wynika z jej cyklicznego cyklu pracy (zwarcie–rozwarcie szczęki ruchomej). Kruszarki młotkowa i walcowa, w których ruch elementów roboczych ma charakter ciągły, nie wykazują tej zmienności natężenia hałasu.



Rys. 3. Zarejestrowany poziom hałasu dla kruszarki młotkowej
 Fig. 3. Noise level for hammer crusher



Rys. 4. Zarejestrowany poziom hałasu dla kruszarki szczękowej
 Fig. 4. Noise level for jaw crusher

Uzyskane wyniki można bezpośrednio porównywać ze sobą i w ten sposób określić uciążliwość dla środowiska danego urządzenia rozdrabniającego. Jednakże każde z przedstawionych urządzeń ma odmienne charakterystyki techniczno-technologiczne, np. różne wydajności, energochłonność czy stopnie rozdrobnienia. Dlatego aby analiza porównawcza była pełniejsza, można uwzględnić także wybrane czynniki technologiczne danego urządzenia. W tym celu zaproponowany został wskaźnik łączący efekty technologiczne w postaci uzyskiwanych maksymalnych stopni rozdrobnienia S_{\max} z poziomem emitowanego hałasu oraz wskaźnik wiążący poziom hałasu z wydajnością Q ; odpowiednio wzory (4) i (5).

$$H_{S_{\max}} = \frac{L_{Aeq}}{S_{\max}} \quad (4)$$

$$H_Q = \frac{L_{Aeq}}{Q} \quad (5)$$

$$H_{Techn} = \frac{L_{Aeq}}{Q \cdot S_{\max}} \quad (6)$$

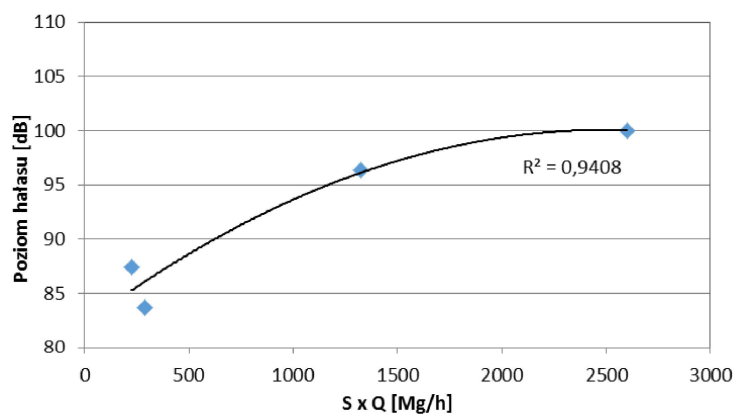
Interpretacja wskaźnika opisanego wzorem (4) jest następująca: jest to poziom hałasu, jaki dane urządzenie generuje przy uzyskiwanym jednostkowym stopniu rozdrobnienia. Wskaźnik opisany wzorem (5) z kolei przedstawia poziom generowanego hałasu w przypadający średnio na jednostkę masy przerabianego materiału. Wprowadzono także dodatkowy wskaźnik, określony jako hałas generowany z uwzględnieniem technologicznych warunków pracy kruszarki, zdefiniowanych jako iloczyn uzyskiwanego stopnia rozdrobnienia i wydajności (6). Odpowiednie wyniki przedstawiono w tabeli 5.

Tab. 5. Hałas w przeliczeniu na stopień rozdrobnienia i wydajność
Tab. 5. Noise level in relation to comminution ratio and throughput

Typ kruszarki	Poziom hałasu/ /stopień rozdrobnienia S	Poziom hałasu/ /wydajność Q	Poziom hałasu/ /wydajność $Q \cdot S$
szczękowa	19,82	0,20	0,04
stożkowa	18,30	0,39	0,07
udarowa	34,62	0,70	0,29
młotkowa	11,62	2,91	0,39
walcowa	37,37	3,35	1,24

Analizując wartości zawarte w tabeli 5 można zauważyć, że przy uwzględnieniu stopnia rozdrobnienia, najkorzystniejszą kruszarką okazuje się kruszarka młotkowa, a następnie kruszarka stożkowa i szczękowa. Z kolei uwzględniając wydajność, najlepiej wypada kruszarka szczękowa, potem stożkowa. Uwzględniając natomiast całościowy efekt technologiczny, kruszarki szczękowa i stożkowa okazały się najlepsze. Ma to oczywiście związek z „wagą”, jaka przypisana jest wydajności i stopniowi rozdrobnienia, niemniej jednak w pewien sposób obrazuje analizowane zagadnienie. Łatwiej to zauważyć na rysunku 5. Widoczny jest wzrost poziomu hałasu w miarę wzrostu iloczynu wydajności Q i stopnia rozdrobnienia S . Bezwzględny poziom hałasu jest największy, czyli najmniej korzystny dla kruszarki szczękowej, ale biorąc po uwagę jej wydajność i stopień rozdrobnienia, względny poziom hałasu jest dla niej najkorzystniejszy. Z przebiegu krzywej na rysunku 4 można wysnuć wniosek, że tempo wzrostu natężenia hałasu maleje w miarę wzrostu wydajności i stopnia rozdrobnienia kruszarek.

Uwzględniając bezwzględny poziom hałasu (tab. 4), okazuje się, że najkorzystniej wypadły pod tym względem kruszarki udarowa i młotkowa. Te dwie maszyny wypadają w tych badaniach korzystnie, jeśli dodatkowo zostanie uwzględniona ich wydajność. Należy jednak zwrócić uwagę na miejsce tych kruszarek w technologicznym ciągu przeróbczym, mianowicie obie pracują na drugim stopniu rozdrobnienia. Można wysnuć więc ostrożny wniosek, że miejsce zainstalowania urządzenia w technologicznym układzie może mieć również wpływ na zróżnicowane wartości poziomu emisji hałasu, analizowane z przyjętego w artykule technologicznego punktu widzenia.



Rys. 5. Poziom hałasu na łączny efekt wydajności i stopnia rozdrobnienia
Fig. 5. Noise level per cumulative effect of comminution and throughput

5. PODSUMOWANIE

Technologiczne układy przeróbki surowców mineralnych, a w szczególności układy produkcji kruszyw, w zasadniczej części oparte są o procesy pomniejszania uziarnienia nadawy. Procesy te, oprócz wysokiej energochłonności, odznaczają się także znacznym stopniem uciążliwości dla środowiska i człowieka poprzez generowane zapylenie oraz hałas. Wyniki badań przedstawione w artykule pokazują, że celowym jest analizowanie poziomu emitowanego przez nie hałasu z uwzględnieniem uwarunkowań produkcyjnych oraz uzyskiwanych efektów technologicznych poszczególnych kruszarek. Okazuje się bowiem, że urządzenia o zbliżonych wartościach emitowanego poziomu hałasu pracują z różną efektywnością, co z kolei ma wpływ na wyniki technologiczne. Spośród analizowanych kruszarek najmniejszą uciążliwością, w odniesieniu do uzyskiwanych maksymalnych stopni rozdrobnienia, wykazała się kruszarka młotkowa. Nieco gorsze wyniki uzyskały kruszarki szczękowa i stożkowa, natomiast najgorsze wskaźniki poziomu hałasu w odniesieniu do efektywności rozdrabniania zanotowano dla kruszarki walcowej. Ta niekorzystna ocena kruszarki walcowej może

mieć związek z tym, że nie była ona w pełni wykorzystana pod względem technologicznym. Kierowana była do niej wąska klasa ziarnowa nadawy w celu „dokruszenia” i uzyskania również wąskiej klasy ziarnowej, ale o drobniejszym uziarnieniu.

Podsumowując wyniki badań przedstawionych w niniejszym artykule można stwierdzić, że uciążliwość środowiskowa różnych typów kruszarek jest zróżnicowana, a ogólna ocena tego wpływu jest bardziej właściwa, gdy brane są pod uwagę także inne czynniki, np. technologiczne, energetyczne czy ekonomiczne.

Artykuł powstał w wyniku realizacji pracy statutowej nr 11.11.100.276

LITERATURA

- BIBLIOTEKA MONITORINGU ŚRODOWISKA, 2011, *Stan środowiska w Polsce – Sygnały 2011*, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa.
- BIURO ANALIZ I DOKUMENTACJI, 2012, *Zagrożenie hałasem – wybrane zagadnienia*, Opracowanie tematyczne nr OT-612, Kancelaria Senatu, Warszawa.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Europy nr 2002/49/WE z dnia 25 czerwca 2002 r. *odnosząca się do oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku*.
- INSPEKCJA OCHRONY ŚRODOWISKA, 2004, *Zanieczyszczenia środowiska hałasem w świetle badań WIOŚ*, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. ws. *dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku*, Dz.U.120.826.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4 listopada 2008 r. ws. *wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji oraz pomiarów ilości pobranej wody*, Dz.U.206.1291.
- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. *Prawo ochrony środowiska*, j.t. Dz.U.2013.1232 ze zm.
- WASILEWSKI S. i in., 2016, *Determination of environmental footprint for various types of comminution devices in terms of dust and noise emission*, Proceedings of XXVIII IMPC, Canada (in press).

ANALYSIS OF NOISE EMISSION FOR SELECTED CRUSHING DEVICES

In mineral processing technology, and especially in aggregate production circuits, comminution plays a crucial role, enabling us obtaining the products with suitable particle size composition. Crushing operations are also very energy consuming ones and are regarded as environmentally burdensome if only due to the excessive noise and dust emission. The article concerns problems of noise generation during operation of crushing devices. Selected types of crushers were under investigations, their noise levels were recorded along with connecting the obtained results with technological effectiveness defined as the comminution ratio and throughput. Results of investigations show that various crushing devices cause different environmental onerousness.

Keywords: *mineral aggregates, noise, crushers*