

*sucha separacja,
kruszywa łamane,
powietrzny stół koncentracyjny*

Stefan GÓRALCZYK, Wiesław BLASCHKE,
Wiesław KOZIOŁ, Wojciech SOBKO¹

WYKORZYSTANIE POWIETRZNYCH STOŁÓW KONCENTRACYJNYCH FGX DO OCZYSZCZANIA KRUSZYW NATURALNYCH ŁAMANYCH

Proces suchej separacji prowadzony z wykorzystaniem powietrznego stołu koncentracyjnego FGX, oparty na wytworzeniu przez nadawę oraz powietrze autogenicznego ośrodka (medium), umożliwia rozdział ziaren w zależności od ich wielkości i gęstości. Zaletą tego procesu jest również możliwość oczyszczania frakcji drobnych z ziaren pyłowych. Wykorzystanie tego procesu stwarza podstawę jego zastosowania w uszlachetnianiu kruszyw łamanych. W Centrum Niskoenergetycznych Technologii Budowlanych i Zarządzania Środowiskiem Instytutu Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego od 2012 roku prowadzi się prace badawcze z wykorzystaniem tego urządzenia. W artykule przedstawiono istotę metody suchej separacji, możliwości przeprowadzenia prób na instalacji badawczej oraz obszary potencjalnego zastosowania tego procesu w celu poprawy parametrów jakościowych kruszyw łamanych.

1. WPROWADZENIE

Urządzenia FGX są to maszyny do suchej separacji, składające się z perforowanego stołu roboczego, urządzenia wibracyjnego, komory powietrznej oraz napędu i me-

¹ Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Warszawa, s.goralczyk@imbigs.pl, viesbla@min-pan.krakow.pl, wieslaw.kozol@agh.edu.pl, w.sobko@imbigs.pl

chanizmu pozwalającego zmieniać kąty nachylenia stołu i częstotliwość wibracji. Nadawa (materiał badawczy) jest podawana poprzez wibrujący zasilacz na stół roboczy pochylany pod różnymi kątami w osi poprzecznej i podłużnej, wprawiany w ruch wibracyjny przez wibrator. Pod spodem stołu znajduje się kilka komór powietrznych zasilanych wentylatorem odśrodkowym. Zawierane powietrze przechodzi przez otwory stołu, tworząc wznoszący prąd powietrza. Pod wpływem połączonych sił wibracji i prądu powietrza nadawa unosi się i w zależności od gęstości ziaren materiału różnicuje się. I tak materiał lżejszy znajduje się na powierzchni złoża zawieszinowego, a frakcje bardziej gęste znajdują się w dolnej jego partii. Materiał drobny w nadawie wraz z powietrzem stanowi autogeniczny ośrodek (medium), tworząc z powietrzem zawieszinę (suspensję) „powietrze-ciało stałe”, zwane złożem fluidalnym. Medium to tworzy w rezultacie warunki do skrzepowanego opadania cząstek w zależności od ich wielkości i gęstości.

W powietrznych stołach koncentracyjnych wykorzystuje się efekt upłynnienia, który powstaje w wyniku interakcji pomiędzy gęstością drobnych cząstek stanowiących zawieszinę, a bardziej gruboziarnistymi cząstkami, co doprowadza do poprawy rozdziału frakcji gruboziarnistych (Baic i in. 2015).

Proces wzbogacania przebiega podobnie do procesu wzbogacania w cieczy ciężkiej. Z uwagi na to, że powietrzny stół koncentracyjny pochylony jest w kierunku poprzecznym, materiał o małej gęstości znajdujący się na powierzchni złoża fluidalnego ma tendencję do przesuwania się po tej powierzchni i spadania w sposób ciągły, pod wpływem sił grawitacji, poprzez przegrodę usytuowaną na brzegu stołu (tzw. przesypem materiału wzbogaconego). Materiał o większej gęstości koncentruje się w dolnej części złoża fluidalnego i przesuwa się w kierunku wylotu produktów odpadowych, poprzez płytę kierującą do zsypu tych produktów. W zależności od rodzaju nadawy i sposobu ustawienia urządzenia może być wytwarzanych wiele rodzajów produktów. Mając na uwadze ochronę środowiska przed zapyleniem, stół przykryty jest zadaszeniem wraz z zabudowanym odpylaczem, gdzie utrzymywane jest ujemne ciśnienie. Zgodnie z danymi producenta 75% zapyłonego powietrza cyrkuluje w obiegu, tzn. za pomocą wentylatora przechodzi przez odpylacz cyklonowy i jest powtórnie używane. Natomiast 25% po odpyleniu odpylaczem workowym ze sprawnością 99,5% uchodzi do atmosfery. W ten sposób urządzenie spełnia surowe wymogi standardów środowiskowych (Baic i in. 2014; Li & Yang 2006).

2. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA EFEKTYWNOŚĆ PROCESU SUCHEJ SEPARACJI

Proces rozdziału wzbogacanego materiału na powietrznych stołach koncentracyjnych FGX zależy od wielu czynników (Baic & Blaschke 2013); do najważniejszych należą:

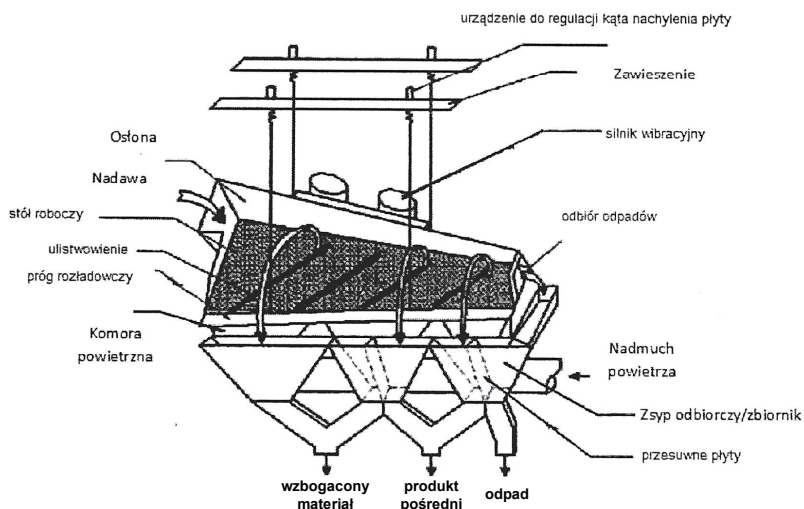
- wstępne przygotowanie nadawy uwzględniające zjawisko równoopadania ziaren,
- wielkość i gęstość ziaren,

- ilość podawanego powietrza,
- wysokość i liczba listew,
- kąt nachylenia (poprzeczny i podłużny) płyty roboczej,
- częstotliwość wibracji płyty roboczej,
- obciążenie (wydajność) wzbogacalnika.

Czynniki te określa się na podstawie badań wzbogacalności materiału badawczego, uwzględniając także żądaną jakość produktów rozdziału. Na tej podstawie ustala się reżim technologiczny procesu jako niezbędnego warunku osiągania założonych parametrów jakościowych produktów rozdziału. Producent powietrznych stołów koncentracyjnych FGX na podstawie własnych badań, a także doświadczeń przemysłowych opracował ogólne zalecenia prowadzenia procesu separacji. W zaleceniach tych zwraca się uwagę na możliwość regulacji parametrów technicznych powietrznego stołu koncentracyjnego (Honaker 2007; Ghost i in. 2013):

- wysokości położenia progu przesypowego w strefie odbioru produktu lekkiego, pośredniego i ciężkiego,
- kąta podłużnego ustawienia płyty roboczej w zakresie $0-2^{\circ}$ i kąta poprzecznego $0-10^{\circ}$,
- ilości doprowadzanego powietrza pod poszczególne strefy rozdziału,
- ustawienia kłap regulujących kierowanie strug materiału do określonych, zdefiniowanych produktów rozdziału.

Regulacja tych parametrów odbywa się w trakcie badań próbnych (wstępnych) w celu otrzymania najkorzystniejszego rozdziału nadawy na poszczególne produkty.



Rys. 1. Schemat powietrznego stołu koncentracyjnego typu FGX-1
Fig. 1. Scheme of FGX-1 air concentrating table

Doświadczenia zagraniczne pokazują, że skuteczność rozdziału zależy także od właściwości parametrów technologicznych kierowanej do wzbogacania nadawy (Blaschke 2013; Li 2006). Zauważono, że wpływ na dokładność rozdziału mają właściwości nadawy: wilgoć całkowita, gęstość, klasa ziarnowa oraz relacja ilości występujących zanieczyszczeń do produktu właściwego. W Centrum Niskoenergetycznych Technologii Budowlanych i Zarządzania Środowiskiem IMBiGS w oparciu o te zalecenia oraz przeprowadzone próby opracowana została metodyka badawcza dla suchej separacji materiałów mineralnych na urządzeniu FGX-1. Na rysunku 1 przedstawiono schemat powietrznego stołu koncentracyjnego, a na rysunku 2 widok płyty roboczej.



Rys. 2. Płyta robocza powietrznego stołu koncentracyjnego typu FGX-1; fot. W. Sobko
Fig. 2. Separating deck of the FGX-1 air concentrating table; photo by W. Sobko

3. INSTALACJA BADAWCZA

Widok instalacji badawczej przedstawiono na rysunku 3 (Baic i in. 2015). Mobilna instalacja badawcza do suchej separacji składa się z modułów:

Moduł zasilania ze zbiornikiem zasypowym, dozownikiem taśmowym z falownikiem, przenośnikiem nadawy wraz z wagą taśmową. Zbiornik zasypowy służy do zmagazynowania partii materiału badawczego; stąd materiał transportowany jest do dozownika taśmowego o regulowanej prędkości podawania, co zapewnia możliwość, w zależności od potrzeb, zmiennego obciążania instalacji. Przenośnik nadawczy służy do transportowania określonej, zadanej ilości materiału do dalszych modułów instalacji. Zabudowana na przenośniku waga służy do rejestracji i monitorowania ilości materiału do dalszych modułów instalacji.



Rys. 3. Instalacja badawcza do suchej separacji; fot. W. Sobko
Fig. 3. Research installation for dry separation; photo by W. Sobko

Moduł klasyfikacji z dwupokładowym przesiewaczem wibracyjnym oraz przenośnikiem do odbioru materiału odsiewowego, produktu dolnego klasyfikacji. Przyjmowany do prac badawczych materiał posiada zróżnicowany skład ziarnowy, który ma istotny wpływ na wyniki procesu suchej separacji. Dwupokładowy przesiewacz wibracyjny służy do modelowania składu ziarnowego partii materiału kierowanego z modułu zasilania. Umożliwia to ograniczenie górnej granicy ziarna > 50 mm, przez odsianie z wykorzystaniem górnego pokładu sitowego oraz zawężanie dolnej granicy ziarna < 25 mm lub < 6 mm, w wyniku odsiania z wykorzystaniem dolnego pokładu sitowego. Dolny odsiew materiału badawczego < 6 mm jest następnie transportowany z instalacji przenośnikiem taśmowym do dolnego produktu klasyfikacji.

Moduł rozdrabniania z podajnikiem wibracyjnym–zsuwnią, kruszarką szczękową, przenośnikiem taśmowym (zwrotnym) do odbioru rozdrobnionego materiału i podawany do modułu zasilania. Odsiany materiał powyżej 50 mm, niepożądany w przyjętej procedurze badawczej, z górnego pokładu przesiewacza jest kierowany podajnikiem wibracyjnym do kruszarki szczękowej. Odpowiednio wyregulowany zakres szczeliny wylotowej kruszarki pozwala na przeprowadzenie procesu rozdrabniania wydzielonej klasy ziarnowej. Rozdrobniony materiał jest odprowadzany z kruszarki szczękowej do stacji zasilania przenośnikiem zwrotnym. Moduł rozdrabniania w tej konfiguracji urządzeń umożliwia rozdrabnianie ziaren do granulacji umożliwiającej przeprowadzenie procesu suchej separacji.

Moduł wzbogacania z przenośnikiem odprowadzającym materiał badawczy z modułu klasyfikacji i rozdrabniania do instalacji suchej separacji wyposażonej w powietrzny stół koncentracyjny typu FGX-1, dodatkowo wyposażony w wagę taśmową. Stół ten stanowi: perforowana płyta robocza z napędem wibracyjnym, umocowana na zawieszach linowych, podajnik wibracyjny, dmuchawa wytwarzająca strumień powietrza z regulowanym układem podawania pod płytę roboczą, kolektor z płynną regulacją odbierający trzy produkty rozdziału, układ wychwytywania wytwarzanego pyłu

podczas procesu rozdziału. Układ ten obejmuje: cyklon zagęszczający strumień zapyłonego powietrza, baterie filtrów workowych i urządzenie wstrząsowe do odbioru pyłu oraz podajnik ślimakowy do odbioru pyłu z instalacji, szafę sterowniczą, przenośnik taśmowy do transportu nadawy do leja zasypowego, przenośnik odbierający produkt odpadowy wyposażony w wagę taśmową, przenośnik odbioru produktu wzbogaconego z wagę taśmową oraz przenośnik odbioru produktu pośredniego. Uzyskane w przeprowadzonych badaniach produkty rozdziału są odprowadzane przenośnikami taśmowymi. Stąd każdy z uzyskanych materiałów jest niezależnym produktem o określonych parametrach ilościowych i jakościowych.

Moduł sterowania stanowi szafa sterownicza umożliwiająca sekwencyjne uruchamianie urządzeń z modułów rozbudowanej instalacji do suchej separacji.

Moduł odpylania ma na celu wychwytywanie pyłu z obiegu powietrza cyrkulującego, a tym samym ochronę środowiska przed zapyleniem; w jego skład wchodzi:

- gumowa kurtyna (okap) uszczelniająca, zabudowana nad płytą roboczą stołu,
- kolektor odprowadzający zanieczyszczone pyłem powietrze z początkowej przestrzeni nad płytą roboczą do cyklonu odpylającego,
- pionowo zabudowany, pracujący w podciśnieniu cyklon, służący do wytrącania ziaren pyłu; ziarna te z cyklonu odprowadzane są przenośnikiem ślimakowym,
- kolektor odprowadzający zanieczyszczone pyłem powietrze z pozostałej przestrzeni nad płytą do baterii filtrów workowych,
- bateria filtrów workowych zakończona zbiornikiem do magazynowania wytrąconego pyłu wraz z urządzeniem wstrząsowym; okresowo uruchamiany mechanizm wstrząsowy powoduje opróżnianie worków z nagromadzonych ziaren pyłowych. W skład tej baterii wchodzi niezależnie pracujący wentylator wyciągowy (pomocniczy) do wytworzenia podciśnienia w końcowej części przestrzeni nad płytą roboczą oraz do wytworzenia ciągu zapyłonego powietrza w kierunku procesu filtracji,
- główny wentylator wyciągowy do wytworzenia podciśnienia w początkowej przestrzeni objętej kurtyną gumową nad płytą roboczą oraz w cyklonie.

4. WYNIKI BADAŃ PRZEMYSŁOWYCH

Zgodnie z informacjami uzyskanymi od producenta, powietrzne stoły koncentracyjne FGX pozwalają na wydzielenie niepożądanych frakcji drobnych i pyłowych z kruszyw naturalnych łamanych. Skutkiem prowadzonego procesu jest możliwość uzyskania znacznej poprawy parametrów jakościowych, np. grysów oraz wydzielenie frakcji drobnych i pyłowych, stanowiących również pełnowartościowy produkt (Blaschke & Baic 2013).

W CNTBiZŚ IMBiGS prowadzi się ukierunkowane prace badawcze nad:

- uszlachetnianiem kruszyw otrzymywanych ze skały płonej poprzez redukcję ilości zanieczyszczeń w postaci drobnej frakcji węglowej oraz uszlachetnianiem zanieczyszczonych kruszyw o uziarnieniu 0-8 mm poprzez wydzielenie organicznej frakcji pyłowej,
- wydzielaniem z odpadów wydobywczych czystych produktów, które mogą być wykorzystywane w pracach inżynierskich, budowlanych i rekultywacyjnych.

W badaniach tych jako kryterium efektywności procesu odkamieniania przyjęto maksymalne wydzielenie produktu kamiennego klasy ziarnowej 8-20 mm (tab. 1) i 8-25 mm (tab. 2).

Tab. 1. Wyniki badań dla produktu kamiennego o granulacji 0–20 mm

Tab. 1. Tests results for the gangue of granulation of 0–20 mm

Nazwa produktu	Uziarnienie [mm]	Wychód [%]
nadawa	0-20	100
w tym klasa ziarnowa	0-8	80
	8-20	20
efekt odkamieniania		
produkt kamienny	8-20	12
produkt zanieczyszczony	0-8	88

Tab. 2. Wyniki badań dla produktu kamiennego o granulacji 8–25 mm

Tab. 2. Tests results for the gangue of granulation of 8–25 mm

Nazwa produktu	Wychód [%]
nadawa	100
produkt kamienny	14
efekt odkamieniania	
produkt zanieczyszczony	86

W badaniach przedstawionych w tabeli 3 jako kryterium efektywności procesu przyjęto wydzielenie z zanieczyszczonych kruszyw o uziarnieniu 0-8 mm maksymalnej ilości produktu pyłowego.

Tab. 3. Wyniki wydzielenia frakcji pyłowej z zanieczyszczonych kruszyw o granulacji 0-8 mm

Tab. 3. Dust separation results from contaminated aggregates of granulation of 0-8 mm

Nazwa produktu	Uziarnienie [mm]	Wychód [%]
nadawa	0-8	100
w tym klasa ziarnowa	0-0,5	6,6
	0,5-8	93,4
efekt odkamieniania		
pył	0-0,5	6,0
produkt zanieczyszczony z niewydzieloną frakcją pyłową	0-8	94,0

W badaniach przedstawionych w tabeli 4 kryterium efektywności procesu odkamieniania było wydzielenie z odpadów wydobywczych maksymalnej ilości produktów kamiennych.

Tab. 4. Wyniki wydzielenia produktów kamiennych z odpadów wydobywczych
Tab. 4. Stone products separation from mining waste

Nazwa produktu	Wychód [%]	Wartość opałowa [kJ/kg]	Skuteczność odkamieniania w funkcji redukcji wartości opałowej [%]
nadawa (odpad wydobywczy)	100	6 630	–
efekt odkamieniania			
produkt kamienny	74,1	–	100
pozostałość (produkt węglowy)	25,9	27 614	0

5. WYNIKI BADAŃ

Zastosowanie metody suchej separacji z wykorzystaniem powietrznego stołu koncentracyjnego FGX dla zaprezentowanych aplikacji badawczych umożliwiło wydzielenie:

- z niskojakościowego produktu kamiennego (nadawa) o uziarnieniu 0-20 mm zawierającego 20% klasy ziarnowej 8-20 mm, pozbawionego zanieczyszczeń produktu kamiennego o uziarnieniu 8-20 mm w ilości 12% w stosunku do masy wejściowej; skuteczność separacji produktu 8-20 mm wyniosła 60%,
- z niskojakościowego produktu kamiennego (nadawa) o uziarnieniu 8–25 mm zanieczyszczonego podziarnem <8 mm produktu kamiennego pozbawionego zawartości podziarna w ilości 14% w stosunku do masy wejściowej,
- z zanieczyszczonych kruszyw o uziarnieniu 0-8 mm produktu pyłowego w ilości 6% w stosunku do masy wejściowej próby badawczej. Skuteczność wydzielenia frakcji pyłowej wyniosła 90,9% w stosunku do zawartej frakcji pyłowej w nadawie. Wydzielenie tej strugi masy pyłowej wpłynęło na poprawę parametrów jakościowych kruszyw. Konieczna jest jednak dalsza separacja zanieczyszczeń frakcji >0,5 mm,
- z odpadów wydobywczych o uziarnieniu 0-90 mm produktów kamiennych w ilości 74,1% w stosunku do masy wyjściowej.

Otrzymane produkty charakteryzują się parametrami, które umożliwiają ich wykorzystanie w pracach inżynierskich, budowlanych i rekultywacyjnych.

5. PODSUMOWANIE

1. Zasada pracy powietrznych stołów koncentracyjnych FGX wykorzystuje w składzie ziarnowym materiału sypkiego różnice w ich gęstości. Powyższa cecha fizyczna pozwala na separację ziaren o różnych gęstościach, a tym samym o różnych właściwościach mechanicznych, fizycznych i chemicznych. Dodatkowo podawane pod płytę roboczą powietrze powoduje przedmuch materiału i w ten sposób wyseparowanie ziaren pyłowych poprzez cyklon i baterie filtrów workowych, będących oddzielnym produktem procesu. Efektem rozdzielania mieszaniny ziaren jest więc możliwość uzyskania produktów o polepszonych parametrach użytkowych. Przekłada się to z kolei na możliwość pozyskania nowych kierunków zbytu i wzrostu przychodów z działalności produkcyjnej.
2. Przykłady wykorzystania tych urządzeń do uszlachetniania kruszyw otrzymywanych ze skały płonej poprzez redukcję ilości zanieczyszczeń w postaci drobnej frakcji węglowej (tab. 1 i 2), uszlachetniania zanieczyszczonych kruszyw o uziarnieniu 8-0 mm poprzez wydzielenie organicznej frakcji pyłowej (tab. 3) oraz wydzielenia z odpadów wydobywczych czystych produktów kamiennych (tab. 4), świadczą o dużej możliwości wykorzystania tej metody w aplikacjach przemysłowych.
3. Opisana metoda suchej separacji daje podstawę do postawienia tezy, że możliwe jest jej zastosowanie w wybranych zakładach surowców skalnych do:
 - usuwania z kruszyw zanieczyszczeń w postaci drobnych frakcji dla poprawy ich parametrów jakościowych,
 - wydzielenie frakcji pyłowej z produktów drobnoziarnistych,
 - odzysku kruszyw z mas ziemnoskalnych i odpadów wydobywczych,
 - odzysku klasy ziarnowej 0-3 mm jako produktu nawozowego z klasy 0-16 mm.

LITERATURA

- BAIC I., BLASCHKE W., SOBKO W., 2015, *Badania nad odkamienianiem energetycznego węgla kamiennego na powietrznych stołach koncentracyjnych*, Annual Set The Environment Protection, Vol. 17, 958–972.
- BAIC I., BLASCHKE W., 2013, *Analiza możliwości wykorzystania powietrznych stołów koncentracyjnych do otrzymywania węglowych paliw kwalifikowanych i substytutów kruszyw*, Polityka Energetyczna, tom 16, zeszyt 3, IGSMiE PAN, Kraków, 247–260.
- BAIC I., BLASCHKE W., SOBKO W., GÓRALCZYK S., BUCHALIK G., 2015, *Nowa ekologiczna metoda usuwania zanieczyszczeń skałę płoną z urobku węgla kamiennego*, Annual Set The Environment Protection, tom 17, 1274–1285.
- BAIC I., BLASCHKE W., SOBKO W., FRAŚ A., 2015, *Application of Air Concentrating Table for Improvement in the Quality Parameters of the Commercial Product "Jaret"*, Inżynieria Mineralna, Rocznik XVI, nr 1 (35), 221–226.

- BAIC I., BLASCHKE W., SZAFARCZYK J., 2015, *Matematyczny model pracy powietrznego stołu koncentracyjnego typu FGX*, Zeszyty naukowe nr 9, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 57–66.
- BAIC I., BLASCHKE W., SZAFARCZYK J., 2014, *Dry deshaling of coal*, Inżynieria Mineralna, Rocznik XV, nr 2 (34), 257–262.
- BAIC I., BLASCHKE W., WITKOWSKA-KITA B., 2014, *Badanie podatności węgla kamiennych na proces rozdziału metodą suchej separacji*, Polityka Energetyczna, tom 17, zeszyt 4, IGSMiE PAN, Kraków, 117–126.
- BLASCHKE W., 2013, *Nowa generacja powietrznych stołów koncentracyjnych*, Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN, Kraków, 67–74.
- BLASCHKE W., BAIC I., 2013, *Wykorzystanie powietrznych stołów koncentracyjnych do otrzymywania substytutów kruszyw metodą deshalingu*, Kruszywa nr 3/2013, 48–50.
- GHOST T., PATIL D., PAREK B.K., HONAKER R.Q., 2013, *Upgrading low Rank Coal Using A Dry, Density – Based Separator Technology*, Proceedings of the 17th International Coal Preparation Congress, Istanbul, 295–308.
- HONAKER R.Q., 2007, *Coarse dry coal cleaning*, University of Kentucky, Department of Mining Engineering, Lexington, Kentucky, USA, Workshop on Coal Beneficiation and Utilization of Rejects Initiatives, Policies and Best Practices, Ranchi, India.
- LI GONGAMIN, 2006, *Coal compound dry cleaning technique-study and practice*, Proceedings of XV International Coal Preparation Congress, Pekin, Chiny, Vol II, 439–447.
- LI GONGMEN, YANG YUNSONG, 2006, *Development and application of FGX series compound dry coal cleaning system*, China Coal – Technology monograph of the Tangsan Shenzou Machinery Co. Ltd., No 1/2006.

USE OF THE FGX AIR CONCENTRATING TABLE FOR REFINING WITH POLLUTION OF NATURAL CRUSHED AGGREGATE

Dry separation process is carried out using air concentration FGX table. It consists in creating (for feed & air) the fluidized bed, which allows separation of grains for depending on their size and density. The advantage of the process is the possibility of treating the fine fraction of the dust particles. Use these advantages of dry separation process creates the basis for its use in refining produced crushed aggregate. In the Center of Low-Energy Construction Technology and Environmental Management in Institute of Mechanized Construction and Rock Mining from 2012 research with the use of this device are carried out. The article presents the essence of the method of dry separation, the feasibility of testing on the pilot plant and the potential areas of application of this process to improve the quality crushed aggregates.

Keywords: *dry separation, crushed aggregates, concentration air table*