

Piotr Filipowicz, Magdalena Borys

**OCENA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH ODPADÓW
POWĘGLOWYCH Z LUBELSKIEGO ZAGŁĘBIA
WĘGLOWEGO POD KĄTEM ICH WBUDOWANIA
W NASYPY PIĘTRZĄCE WODĘ**

***THE MECHANICAL PARAMETERS OF MINING WASTE
FROM LUBLIN COAL CARREER CONSIDERED
AS MATERIAL FOR LEVELS HYDROTECHNICAL
STRUCTURES***

Streszczenie

W artykule podano ogólną charakterystykę odpadów powęglowych pochodzących z kopalni Węgla Kamiennego Bogdanka z Lubelskiego Zagłębia Węglowego. Szczegółowo zostały omówione właściwości geotechniczne m.in.: uziarnienie, wilgotność naturalna, wilgotność optymalna, maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, wytrzymałość na ścinanie. Parametry te scharakteryzowano w zależności od różnego czasu składowania tych odpadów.

Słowa kluczowe: odpady powęglowe, właściwości mechaniczne gruntów, wytrzymałość na ścinanie, skład granulometryczny, nasypy ziemne

Summary

The article presents the properties of mining wastes from the Bogdanka Mine in Lubelski Coal Basin. Most important geotechnical parameters, which should be known in designing engineering embankments are discussed in details. These parameters are: grain size distribution and shear strength of soil. The water content, optimum moisture content, maximum dry density of solid particles are also presented. These parameters will be characterised in relation to the different storage time.

Key words: Mining waste, mechanical parameters of soils, hydrotechnical structures

WSTĘP

Jednym ze sposobów utylizacji odpadów powęglowych może być ich wykorzystanie w budownictwie ziemnym, w tym do budowy korpusów nasypów piętrzących stale lub okresowo wodę. Zastosowanie odpadów jako gruntu budowlanego wymaga znajomości ich parametrów geotechnicznych.

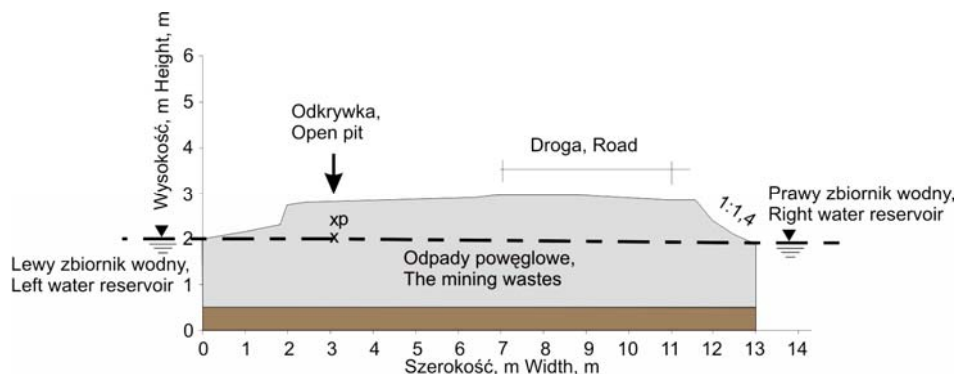
Dotychczasowe prace badawcze pod tym kątem dotyczyły głównie odpadów pochodzących z kopalń śląskich, między innymi Skarżyńskiej [1997], Skarżyńskiej i Burdy [1988], Skarżyńskiej i in. [1987], Kozielskiej-Sroki [1995], Gruchota [2001], Pieczyraka [2004]. Wyniki badań odpadów pochodzących z Lubelskiego Zagłębia Węglowego, które jest eksploatowane krócej, są znacznie skromniejsze i rzadziej prezentowane w publikacjach [Borys i in. 2002; Borys, Filipowicz 2004a, 2004b, 2005; Filipowicz 2006].

Lubelskie Zagłębie Węglowe jest źródłem znacznej ilości odpadów. Średnio rocznie produkuje się tam ponad 2 mln Mg odpadów powęglowych, z czego około 65% składowane jest na hałdzie przy Kopalni Węgla Kamiennego „Bogdanka”. Pozostałą część wykorzystuje się do rekultywacji wyrobisk odkrywkowych po kruszywach, budowy i remontu dróg lokalnych oraz produkcji materiałów budowlanych. Wydaje się, że znaczna część tych odpadów mogłaby być wykorzystana do budowy i modernizacji takich nasypów wodnomelioracyjnych, jak wały przeciwpowodziowe czy ogroblowania zbiorników wodnych.

Dlatego też w ramach niniejszej pracy omówiono badania, którymi objęto odpady powęglowe pochodzące z kopalni Węgla Kamiennego Bogdanka z Lubelskiego Zagłębia Węglowego. Szczegółowo zostały omówione właściwości geotechniczne tych odpadów, m.in.: uziarnienie, wilgotność naturalna, wilgotność optymalna, maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, wytrzymałość na ścinanie. Parametry te scharakteryzowano w zależności od różnego czasu składowania tych odpadów. Uzyskane wyniki badań porównano z wynikami innych badaczy, dotyczącymi głównie odpadów powęglowych pochodzących z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, a także z innych terenów Europy.

ZAKRES I METODYKA BADAŃ

Do badań wykorzystano odpady pochodzące z bieżącej produkcji, które pobrano bezpośrednio z taśmociągu transportującego na składowisko przy kopalni Bogdanka, a także odpady składowane tam przez około 5 i 7 lat. Porównawczo wykorzystano również wyniki uzyskane dla prób pobranych po 10 latach eksploatacji z grobli międzystawowej pełniącej jednocześnie rolę drogi, wykonanej na przełomie lat 1993 i 1994 z odpadów powęglowych świeżych transportowanych prosto z kopalni. Przekrój poprzeczny pokazano na rysunku 1.



Rysunek 1. Przekrój poprzeczny przez groblę: x – miejsce pobrania dużych prób do szczegółowych badań w laboratorium, p – miejsce określenia gęstości objętościowej wbudowanych odpadów powęglowych [Filipowicz, Borys 2006]

Figure 1. Cross-section of embankment: x – place of large samples taking for detailed laboratory studies, p – place of determination of bulk density of built-in coal mine wastes [Filipowicz, Borys 2006]

We wstępnej fazie określono podstawowe parametry pobranych do badań prób odpadów, w tym uziarnienie, wilgotność naturalną, wilgotność optymalną i maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego.

Skład granulometryczny określano metodą sitową po wstępnym namoczeniu próbki odpadów, powodującym odklejenie się cząstek, należących do frakcji pyłowej i ilowej od cząstek grubszych. Odważoną próbkę odpadów o masie 5 kg w pierwszej kolejności moczone w wodzie przez kilka godzin, a następnie płukano pod bieżącą wodą przez sito o wymiarze oczek 0,063 mm. Przepłukane próbki suszono w temperaturze 105 ± 5 °C przez co najmniej 24 godziny. Tak przygotowane próbki po wysuszeniu do suchej masy przesiewano przez 5 minut w wytrząsarce przez sita kwadratowe o wymiarze boku 40,0 mm, 25,0 mm, 10,0 mm, 2,0 mm, 1,0 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,1 mm oraz 0,063 mm. Na podstawie masy uzyskanej na poszczególnych sitach (z uwzględnieniem masy cząstek wypłukanych) obliczano zawartość poszczególnych frakcji i wykresowano krzywą uziarnienia.

Z uwagi na fakt, iż zawartość cząstek o średnicy przekraczającej 40 mm była stosunkowo niewielka (średnio 5%), uznano że parametry zagęszczania i wytrzymałościowe badanych odpadów można określić bez wstępnej segregacji materiału.

Parametry zagęszczania odpadów badano w aparacie Proctora metodą II wg PN-88/B-04481. Badania wykonywano na próbkach, których skład uziarnienia był pełny, z wyjątkiem kilku próbek, z których usunięto pojedyncze kamienie o średnicy ponad 40,0 mm. Aby wyeliminować wpływ kruszenia ziaren

podczas procesu zagęszczania badania wykonywano za każdym razem na nowych próbkach odpadów.

Właściwości mechaniczne, tj. spójność i kąt tarcia wewnętrzznego odpadów powęglowych badano z zastosowaniem 2 aparatów: aparatu trójosiowego ściskania i aparatu bezpośredniego ścinania.

Odpady świeże oraz składowane na hałdzie przez 7 lat poddano badaniom wytrzymałości na ścinanie w wielkowymiarowym aparacie trójosiowego ściskania w laboratorium Katedry Geoinżynierii SGGW w Warszawie. Badania wykonywano metodą UU, tj. bez konsolidacji i bez odpływu w trakcie ścinania ze stałym ciśnieniem σ_3 w komorze wynoszącym 50, 100 i 150 kPa. Próbki miały pełen skład uziarnienia. Odpady doprowadzano do wilgotności zbliżonej do optymalnej, a następnie odważano taką masę, aby można było uformować pojedynczą próbkę o wskaźniku zagęszczenia wynoszącym około 0,92. Odważony materiał zagęszczano warstwami o grubości 50 mm każda w specjalnym cylindrze o średnicy 250 mm i wysokości 500 mm, za pomocą ubijaka z ręcznego aparatu Proctora o masie 4,1 kg, który zrzucano z wysokości 320 mm, co odpowiadało pracy zagęszczania wynoszącej $0,59 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$. Tak przygotowana próbka była gotowa do badania, które to przeprowadzano ze stałą prędkością odkształcenia, wynoszącą $25 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$.

Aparat bezpośredniego ścinania zastosowany do badań był wyposażony w skrzynkę o wymiarach 120x120x60 mm. Z badanych próbek usuwano jedynie pojedyncze kamienie występujące w niektórych z nich. Próbki odpadów powęglowych doprowadzano do wilgotności optymalnej, a następnie zagęszczano bezpośrednio w skrzynce aparatu, poprzez ubijanie ręczne w 3 warstwach, tak aby uzyskać wskaźnik zagęszczenia wynoszący około 0,92. Ścinanie wykonywano z prędkością odkształcenia $0,1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, stosując kolejno naprężenia normalne σ wynoszące 15, 30, 45, 60, 75, 90 kPa. Badania w warunkach kolejnych naprężeń prowadzono każdorazowo z nowymi próbkami.

WYNIKI BADAŃ

Analiza wyników badań odpadów powęglowych, przeprowadzonych przez Skarżyńską [1997], z Lubelskiego Zagłębia Węglowego pozwoliła zauważyć wyraźny wpływ długości okresu składowania na hałdzie. Stwierdzono, że im starsze są odpady, tym zawierają coraz mniej cząstek grubych i więcej cząstek drobnych (tab. 1).

We wszystkich próbkach największą część zajmowała frakcja zwirowa – od 70 do 75% w odpadach świeżych, od 58 do 74% w próbkach 5-letnich oraz od 45 do 67% w odpadach 7-letnich. Wraz z upływem czasu składowania odpadów powęglowych zaobserwowano zmniejszenie udziału frakcji zwirowej (maksymalnie o 30% po 7 latach ich składowania), a także frakcji kamienistej. W odpadach wieloletnich frakcja kamienista reprezentowana jest przez pojedyn-

cze kamienie, a w ponad połowie przebadanych próbek odpadów 5- i 7-letnich cząstki o średnicy przekraczającej 40,0 mm nie występowały. Odpady te charakteryzują się wysoką zawartością cząstek bardzo drobnych. Udział frakcji pyłowej w próbkach odpadów świeżych dochodzi do blisko 20%, a odpadów wieloletnich może przekraczać 30%. W próbkach pobranych z 10-letniej grobli stawowej zawartości poszczególnych frakcji były podobne do wartości określonych dla odpadów świeżych.

Tabela 1. Zakresy uziarnienia odpadów powęglowych z kopalń Lubelskiego Zagłębia Węglowego (LZW) i Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) dane wg Skarżyńskiej [1997]

Table 1. Grain size distribution of coal mine wastes from mines in Lubelski Coal Basin (LZW) and Upper Silesia Coal Basin (GZW) data according Skarżyńska [1997]

Odpady Wastes	Zawartość frakcji, % / Content of the fraction, %			
	kamienista cobble	żwirowa gravel	piaskowa sand	pyłowa silt
„LZW” KWK „Bogdanka”				
– świeże fresh	0–12	70–75	6–10	8–19
– 5-letnie 5-years old	0–5	58–74	13–23	12–19
– 7-letnie 7-years old	0–8	45–67	14–19	19–34
10-letnia grobla międzystanowa 10-years old embankment				
„GZW” Ze zwałowisk From dumping sites	0–13	70–80	6–12	8–21
– nowych new	30–38	43–54	10–15	3–8
– wieloletnich old	4–18	38–61	9–21	2–30

Odpady powęglowe z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w porównaniu do badanych odpadów z Lubelskiego Zagłębia Węglowego zawierają zdecydowanie więcej grubych cząstek i mniej cząstek drobnych, co można zauważyć na podstawie przykładowych danych zmieszczonych w tabeli 1 wg Skarżyńskiej [1997].

Zmiany w uziarnieniu odpadów powęglowych powodują zmianę innych parametrów geotechnicznych.

W przypadku parametrów zagęszczenia badanych odpadów stwierdzono wyraźną tendencję spadkową wartości maksymalnej gęstości objętościowej i rosnącą wilgotności optymalnej odpadów powęglowych wraz z czasem ich składowania na hałdzie. Wilgotność optymalna badanych odpadów świeżych wynosiła średnio około 12% i zwiększyła się średnio o 2% dla materiału po 5 latach składowania na hałdzie i o około 4% dla materiału po 7 latach składowania. Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego zmniejszyła się od

wartości wynoszącej około $1,835 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ w odpadach świeżych do wartości równej $1,730 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ w odpadach 5-letnich i do wartości $1,685 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ w odpadach 7-letnich.

Dla odpadów powęglowych z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego Skarżyńska [1997] zaobserwowała podobne tendencje wzrostowe dla wilgotności optymalnej, tj. od wartości w zakresie pomiędzy 7 a 12% dla odpadów świeżych do 11–19% dla materiału wieloletniego. Maksymalna gęstość objętościowa zawierała się w zakresie od $1,7 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ do $1,9 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ w odpadach świeżych, natomiast w odpadach wieloletnich wynosiła od $1,2 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ do $2,0 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

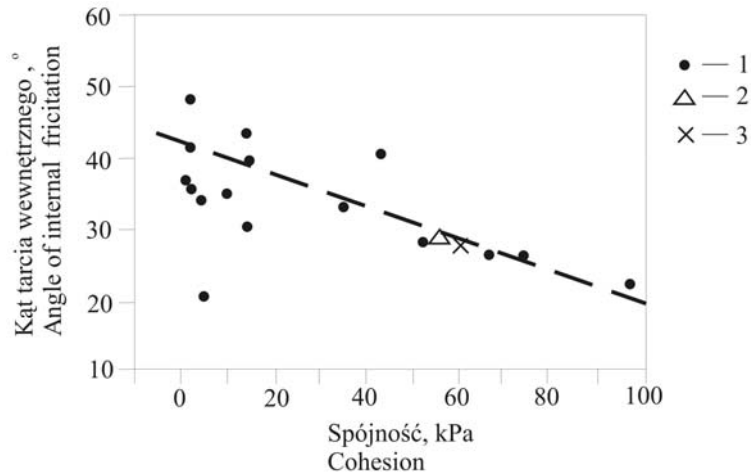
Parametry wytrzymałościowe badanych odpadów z Lubelskiego Zagłębia Węglowego zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry wytrzymałościowe odpadów powęglowych z Lubelskiego Zagłębia Węglowego o zróżnicowanym okresie składowania

Table 2. Shear strength of the mining waste in Lubelski Coal Basin depending on the different store time

Aparat Apparatus	Pozorny kąt tarcia wewnętrznego, ° Apparent angle of internal friction, °			Spójność, kPa Cohesion, kPa		
	Świeże odpady Fresh wastes	5-letnie odpady 5-year old wastes	7-letnie odpady 7-year old wastes	Świeże odpady Fresh wastes	5-letnie odpady 5-year old wastes	7-letnie odpady 7-year old wastes
	aparat trójosiowego ściskania large triaxial apparatus	29	–	27	48	–
aparat bezpośredniego ścinania direct shear apparatus	43 – 55	34 – 35	27 – 39	22 – 32	21 – 35	25 – 40
10-letni nasyp 10-years old embankment	31–50			20–51		

Wartości uzyskane w badaniach z wykorzystaniem aparatu trójosiowego ściskania porównano z uzyskanymi z wykorzystaniem podobnego aparatu, ale w odpadach pochodzących z hałd w Wielkiej Brytanii [Skarżyńska 1997], co pokazano na wykresie w postaci zależności kąta tarcia wewnętrznego od spójności (rys. 2). Porównanie to wykazało dużą zbieżność uzyskanych wyników własnych z badaniami brytyjskimi.



Rysunek 2. Porównanie pozornego kąta tarcia wewnętrznego i spójności odpadów powęglowych określonych z wykorzystaniem wielkowymiarowego aparatu trójosiowego ściskania: 1 – odpady z hałd w Wielkiej Brytanii [Skarżyńska 1997], 2 – świeże odpady z Lubelskiego Zagłębia Węglowego, 3–7-letnie odpady z Lubelskiego Zagłębia Węglowego
Figure 2. Comparison of apparent angle of internal friction and cohesion of the mining waste determined at large dimension triaxial apparatus: 1 – wastes from dumping sites in Great Britain [Skarżyńska 1997], 2 – fresh wastes from Lubelskie Coal Basin, 3–7 years old wastes from Lubelski Coal Basin.

Wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności uzyskane na podstawie badań z wykorzystaniem obu aparatów świadczą, że wielkość badanej próby ma bardzo istotne znaczenie podczas oznaczania parametrów mechanicznych odpadów powęglowych. Wydaje się, że bardziej wiarygodne są wyniki otrzymane z badań w wielkowymiarowym aparacie trójosiowego ściskania, natomiast wyniki otrzymane za pomocą aparatu bezpośredniego ścinania należy traktować jako obciążone znacznym błędem pomiarowym. Za to ukazują one tendencje, jakie występują w zależności od zmiany uziarnienia odpadów w związku z długością okresu ich składowania.

Wyniki badań przeprowadzone w aparacie bezpośredniego ścinania z odpadami powęglowymi świeżymi i pobranymi z hałdy o różnym okresie składowania potwierdziły, że wraz z postępującym procesem wietrzenia zmniejsza się wartość ich kąta tarcia wewnętrznego, natomiast wartość spójności się zwiększa. Odpady powęglowe świeże charakteryzowały się kątem tarcia wewnętrznego wynoszącym od $42^{\circ}58'$ do $55^{\circ}00'$, natomiast odpady 7-letnie od $27^{\circ}30'$ do $38^{\circ}58'$. Kąt tarcia wewnętrznego określany na podstawie badania za pomocą wielkowymiarowego aparatu trójosiowego ściskania był mniejszy od wartości średniej oznaczonej w aparacie bezpośredniego ścinania o około 14° dla odpa-

dów świeżych oraz o około 5° w przypadku odpadów składowanych na hałdzie przez 7 lat. Spójność oznaczona w wielkowymiarowym aparacie trójosiowego ściskania w porównaniu z wartością średnią otrzymaną w wyniku badań za pomocą aparatu bezpośredniego ścinania była większa o około 24 kPa w próbkach świeżych i o około 26 kPa w próbkach 7-letnich. Zaobserwowane zmiany wartości parametrów wytrzymałościowych nastąpiły na skutek rozpadu grubych cząstek na drobniejsze. Grube ostrokrawędziste cząstki znajdujące się w odpadach powęglowych świeżych, klinując się, powodują występowanie dużych wartości kąta tarcia wewnętrznego. W odpadach wieloletnich grube cząstki o kształcie ostrokrawędzistym występują rzadko, dlatego obserwujemy mniejsze wartości kąta tarcia wewnętrznego. Większa spójność odpadów powęglowych wieloletnich w porównaniu ze świeżymi spowodowana jest dużym udziałem frakcji drobnych, głównie pyłowej i iłowej.

Tendencje zmiany parametrów wytrzymałościowych odpadów z Lubelskiego Zagłębia Węglowego są podobne do prezentowanych w literaturze w odniesieniu do odpadów pochodzących z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. W zależności od długości okresu składowania na hałdzie wartość kąta tarcia wewnętrznego odpadów pochodzących z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego może zmniejszyć się nawet o około 20°, natomiast różnica wartości spójności między odpadami świeżymi a wieloletnimi może wynieść około 50 kPa, a nawet więcej [Kawalec 1976; Krzyk 2001; Skarżyńska 1997].

WNIOSKI

1. Uziarnienie badanych odpadów powęglowych pochodzących z Lubelskiego Zagłębia Węglowego różni się od uziarnienia odpadów świeżych z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, mimo że zawierają one najwięcej cząstek należących do frakcji żwirowej. Występuje natomiast znacznie mniej cząstek należących do frakcji kamienistej i znacznie więcej należących do frakcji pyłowej.

2. Uziarnienie badanych odpadów zależy od długości okresu składowania na hałdzie. W starszych próbkach udział frakcji żwirowej i kamienistej jest znacznie mniejszy niż w świeżych, większy udział mają natomiast frakcje: piaskowa, pyłowa i iłowa.

3. W badanych odpadach zaobserwowano tendencję spadkową maksymalnej gęstości objętościowej oraz rosnącą wilgotności optymalnej i naturalnej wraz z długością okresu składowania odpadów na hałdzie.

4. Wraz z upływem czasu składowania odpadów na hałdzie zmniejsza się wartość kąta tarcia wewnętrznego, natomiast zwiększa spójność. Jest to spowodowane rozpadem grubych ziaren na drobne.

5. Odpady powęglowe łatwo ulegają wietrzeniu, w wyniku czego grube cząstki szybko ulegają rozkruszeniu na drobne frakcje. Mimo to charakteryzują

się one dobrą zagęszczalnością i dość wysokimi parametrami wytrzymałościowymi.

6. Parametry geotechniczne świeżych odpadów powęglowych, 5- i 7-letnich, świadczą, że materiał ten może być wykorzystywany w budownictwie, zwłaszcza do budowy lub w modernizacji obwałowań przeciwpowodziowych.

BIBLIOGRAFIA

- Borys M., Filipowicz P. *Geotechnical parameters of mine wastes from The Lubelske Coal Basin as a material for hydrotechnical embankments*. Journal of Water and Land Development, No. 8, 2004, s.163–170.
- Borys M., Filipowicz P. *Possible utilization of mining wastes from the Lubelske Coal Basin for hydrotechnical structures*. Polish Journal of Environmental Studies – vol. 13, supplement III, 2004, s. 146–148.
- Borys M., Filipowicz P. *Charakterystyka odpadów pogórnich i energetycznych dla ich zastosowania do budowy i modernizacji nasypów hydrotechnicznych*. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, z. 506, Warszawa 2005, s.77–84.
- Borys M., Mosiej K., Czartoryjski J., Filipowicz P. *Wytyczne stosowania odpadów pogórnich z kopalni Bogdanka do budowy wałów przeciwpowodziowych i innych budowli hydrotechnicznych*. Wydawnictwo IMUZ Falenty, 2002, s. 68.
- Filipowicz P., Borys M. *Zakres zmienności wybranych parametrów geotechnicznych odpadów powęglowych wbudowanych w nasypy*. Wydawnictwo IMUZ. Woda–Środowisko–Obszary Wiejskie t. 6 z. 1 (16), 2006, s. 99–114.
- Filipowicz P. *Wpływ czynników środowiskowych na parametry geotechniczne odpadów powęglowych w aspekcie ich zastosowania do budowy nasypów wodno-melioracyjnych*. Rozprawa doktorska, Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach, s. 195, Falenty 2006.
- Gruchoń A. T. *Parametry wytrzymałościowe odpadów powęglowych w świetle badań laboratoryjnych prowadzonych w aparaturze średniowymiarowej*. Przegląd Naukowy Wydziału Inżynierii i Kształtowania Środowiska. z. 20, 2001, s. 19–27.
- Kawalec B. *Metody empiryczne ustalania wartości kątów tarcia wewnętrznego materiałów gruboziarnistych*. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej, Seria: Budownictwo z. 40, 1976, s. 33–41.
- Kozielska-Sroka E. *Wpływ wietrzenia na wytrzymałość na ścinanie odpadów powęglowych*. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie, nr 298, 1995, s. 365–377.
- Krzyk P. *Wpływ czasu składowania na zmianę wybranych parametrów geotechnicznych nieprzepalonych odpadów powęglowych Kopalni Anna*. Przegląd Naukowy Wydziału Inżynierii i Kształtowania Środowiska, z. 20, Warszawa 2001, s. 41–53.
- Pieczyrak J. *Charakterystyka i przydatność techniczna odpadów górnictwa węgla kamiennego. Zastosowanie odpadów przemysłowych i geosyntetyków w budownictwie ziemnym*. Wydawnictwo AR Kraków, 2004, s.177–183.
- PN-88/B-04481: *Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu*.
- Skarżyńska K. M. *Odpady powęglowe i ich zastosowanie w inżynierii lądowej i wodnej*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Krakowie, 1997, s. 199.
- Skarżyńska K. M., Burda H. *Analiza kontroli jakości zagęszczania nasypów wykonanych z nieprzepalonych odpadów węgla kamiennego*. Gosp. Wod. nr 10, 1988, s. 231–233.
- Skarżyńska K. M., Burda H., Kozielska-Sroka E., Michalski P. *Laboratory and site investigations on weathering of coal mining wastes as a fill material in earth structures*. [W:] *Reclamation, treatment and utilization of coal mining wastes*. Pr. zbior. Red. A.K.M. Rainbow. Amsterdam: Elsevier Sci. Publ. B.V. 1987, s. 179–195.

Piotr Filipowicz, Magdalena Borys

Dr inż. Piotr Filipowicz, doc. dr hab. inż. Magdalena Borys
Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach
05-090 Raszyn Al. Hrabstwa 3
tel.: 0 22 720-05-31
e-mail: p.filipowicz@imuz.edu.pl, m.borys@imuz.edu.pl

Recenzent: *Dr hab. inż. Jan Kępiński (Prof. UP)*