

Eugeniusz Zawisza

**ANALIZA PRZYDATNOŚCI
DROBNOZIARNISTYCH ODPADÓW PRZEMYSŁOWYCH
DO USZCZELNIANIA OBWAŁOWAŃ
PRZECIWPOWODZIOWYCH**

***THE ANALYSIS OF USABILITY OF FINE-GRAINED
INDUSTRIAL WASTES FOR FLOOD EMBANKMENTS
SEALING***

Streszczenie

Artykuł dotyczy możliwości wykorzystania drobnoziarnistych odpadów przemysłu energetycznego (popiołów lotnych) oraz węglowego (szlamów poflotacyjnych) do uszczelniania wałów przeciwpowodziowych. Ze względu na to, że są to nasypy hydrotechniczne, na które okresowo oddziałuje woda, powinny one spełniać określone dla tego typu obiektów wymagania, dotyczące głównie stateczności i szczelności. W pracy dokonano analizy uziarnienia, wodoprzepuszczalności i zagęszczalności wybranych popiołów lotnych i szlamów powęglowych w aspekcie ich zastosowania do formowania przesłon uszczelniających w wałach przeciwpowodziowych. Stwierdzono, że stosowanie popiołów lotnych lub szlamów powęglowych do uszczelniania wałów jest skuteczne, ponieważ pozwala na uzyskanie wartości współczynnika filtracji rzędu 10^{-7} – 10^{-8} m·s⁻¹, to jest mniejszej od wymaganej ($k < 10^{-6}$ m·s⁻¹) dla materiałów stosowanych do nasypów hydrotechnicznych.

Słowa kluczowe: wały przeciwpowodziowe, uszczelnienia

Summary

The paper regards the possibility of using fine-grained power industry wastes (fly ashes) or coal mining wastes (post-flotation sludges) for flood embankments sealing.

Owing to the fact, that those are hydraulic embankments, and they are subjected periodically to the influence of water, they should meet requirements prescribed to this type of structures, referring mainly to the stability and leak

tightness. An analysis of granulation, water permeability and compactibility of chosen fly ashes and coal mining sludges in the aspect of their applying as sealing screens in flood embankments was carried out in the paper. It was stated that using fly ashes or coal mining sludges for sealing the embankments is efficacious, since it contributes to getting the value of permeability coefficient in the order of 10^{-7} – 10^{-8} $m \cdot s^{-1}$, that is less than the required one ($k < 10^{-6}$ $m \cdot s^{-1}$) for the materials used for hydraulic embankments.

Key words: flood embankments, sealing

WSTĘP

Obwałowania przeciwpowodziowe powinny się charakteryzować odpowiednim dla danej klasy obiektu zagęszczeniem i nachyleniem skarp celem zapewnienia ich stateczności. Powinny również być zbudowane z gruntów o odpowiednim uziarnieniu, celem zapewnienia odpowiedniej szczelności. Istniejące obwałowania budowane były dość często z gruntów o stosunkowo dużej przepuszczalności hydraulicznej. Ponadto w trakcie eksploatacji ich przepuszczalność zwiększa się z czasem, ze względu na niekorzystne efekty przepływu filtracyjnego wody przez obwałowanie (sufozję, wyparcie, a nawet przebicie hydrauliczne). W ich wyniku następuje pogorszenie stanu technicznego i bezpieczeństwa obwałowań, aż do całkowitej utraty funkcji, do pełnienia której były zbudowane [Batog, Machajski 2007]. Stąd też niezbędna jest modernizacja starszych obwałowań dla poprawy ich stanu technicznego, a w efekcie przywrócenia zdolności do ochrony przeciwpowodziowej. Modernizacja taka, oprócz niezbędnego przeważnie dogęszczenia gruntu i uformowania skarp o odpowiednim nachyleniu, co ma na celu poprawę warunków stateczności, powinna obejmować także ich uszczelnienie poprzez zastosowanie pionowej przesłony w osi obwałowania lub ekranu przy skarpie odwodnej.

Celem niniejszej pracy jest przeprowadzenie analizy możliwości wykorzystania popiołów lotnych lub szlamów poflotacyjnych z węgla kamiennego jako gruntu antropogenicznego do formowania przesłon uszczelniających w wałach przeciwpowodziowych.

METODYKA I MATERIAŁY BADAWCZE

Do uszczelnień stosowane są różne materiały i metody. Powszechnie stosowanymi dotychczas materiałami do uszczelnień są grunty spoiste (gliny, ropy), jak również beton, żelbet, asfaltobeton, różnego rodzaju folie oraz hydrotechniczne masy asfaltowe. Służą one do uszczelnień głównie korpusów wałów lub zapór ziemnych (rdzenie, ekrany). Do uszczelniania podłoża metodą iniekcyjną stosowane są roztwory cementowo-wodne (ewentualnie z dodatkiem ropy), krzemiany oraz żywice organiczne. Inne metody polegają na wykonywaniu przesłon

szczelnych w wykopach wąskoprzestrzennych pod osłoną zawiesziny tiksotropowej (przesłona szczelinowa) lub wgłębnym mieszanii (*deep mixing*); stosuje się też metodę wibracyjną [Czyżewski i in. 1973; Głuszkiewicz 2000; Podstawy ... 2005].

Alternatywnymi materiałami, w stosunku do wyżej opisanych, mogą być drobnoziarniste odpady przemysłu energetycznego (popioły lotne) lub węglowego (szlamy poflotacyjne). Dla określenia przydatności tego typu materiałów do uszczelnień przeprowadzono analizę ich właściwości geotechnicznych obejmujących uziarnienie, plastyczność, wodoprzepuszczalność i zagęszczalność materiałów. Podstawę analizy stanowiły wyniki kompleksowych badań prowadzonych od wielu lat w Zakładzie Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziemięgo Akademii Rolniczej w Krakowie.

Przedmiotem analizy były dwie grupy materiałów. Pierwszą stanowiły popioły lotne z elektrowni Rybnik i Skawina oraz z elektrociepłowni Inowrocławskich Zakładów Chemicznych „Soda Mątwy” S.A. i z elektrociepłowni Kraków. Drugą stanowiły szlamy poflotacyjne z osadników zakładów odzysku węgla: na zwałowisku w Smolnicy (osadnik w Trachach zakładu Gwarex Ryan) oraz w Siemianowicach (osadnik zakładu Haldex).

WŁAŚCIWOŚCI GEOTECHNICZNE BADANYCH MATERIAŁÓW UZIARNIENIE

Popioły lotne według klasyfikacji geotechnicznej odpowiadają pyłom lub pyłom piaszczystym różnoziarnistym (elektrownia Rybnik, elektrownia Skawina i elektrociepłownia Kraków) lub bardzo różnoziarnistym (elektrociepłownia Inowrocławskich Zakładów Chemicznych „Soda Mątwy” S.A.) [PN-86/B-02480]. Dominują cząstki odpowiadające frakcjom piaskowej i pyłowej (łącznie od około 90 do 99%), przy niedużej ilości cząstek odpowiadających frakcji ilowej (1–8%) oraz okruchów odpowiadających frakcji żwirowej (0–2%) (tab. 1).

Szlamy poflotacyjne pod względem geotechnicznym można zakwalifikować do glin zwięzłych. Zawartość cząstek odpowiadających frakcji piaskowej wynosi około 28–29%, frakcji pyłowej od 43 do 48%, a frakcji ilowej od 24 do 28% (tab. 1).

PLASTYCZNOŚĆ

Plastyczność materiału określa się przez wskaźnik plastyczności ($I_p = w_L - w_p$; gdzie w_L – granica płynności, w_p – granica plastyczności).

Tabela 1. Podstawowe właściwości fizyczne popiołów i szlamów poflotacyjnych
Table 1. Basic physical properties of ashes and post-flotation sludges

Parametr Parameter	Popioły Ashes				Szlamy poflotacyjne Post-flotation sludges	
	Elektrownia Rybnik Power plant Rybnik	Elektrownia Skawina Power plant Skawina	Elektrociepłownia Kraków Power station Kraków	Elektrociepłownia IZCh „Soda Mątwy” S.A. Power station IZCh „Soda Mątwy” S.A.	Gwarex-Ryan Trachy	Haldex-Miechat Siemianowice
zawartość frakcji / fraction content [%] – zwirowa / gravel 40–2 mm – piaskowa / sand 2–0,05 mm – pyłowa / silt 0,05–0,002 mm – ilowa / clay < 0,002 mm	– 40 59 1	2,1 57,6 36,8 3,5	– 25,10 67,41 7,49	1,87 41,87 38,37 7,89	– 29 43 28	– 28 48 24
klasyfikacja wg / classification according to pn 86/b-02480	Π _p	Π _p	Π	Π ₃	G _z	G _z
wskaznik jednorodności uziarnienia / uniformity coefficient u [–]	6,5	12	14	17,6		
gęstość właściwa / specific gravity ρ_s [g·cm ⁻³] maksymalna gęstość objętościowa szkieletu / maximum dry density ρ_{ds} [g·cm ⁻³]	2,16	2,43	2,24	2,33	2,27	2,26
wilgotność optymalna / optimum moisture content w_{opt} [%]	1,28	1,145	1,33	1,19	1,42	1,45
współczynnik filtracji / permeability coefficient k_{10} [m/s]	22,05	35,95	21,03	34,10	21,6	21,0
przy / at: $i_s = 0,85$ $i_s = 0,90$ $i_s = 0,95$ $i_s = 1,00$	$9,8 \cdot 10^{-7}$ $3,3 \cdot 10^{-7}$					$1,94 \cdot 10^{-7}$ $1,32 \cdot 10^{-7}$ $5,55 \cdot 10^{-8}$ $3,42 \cdot 10^{-8}$
granica płynności / liquid limit [%]					43,25	40,9
granica plastyczności / plastic limit [%]					22,95	21,3
wskaznik plastyczności / plasticity index [%]					20,3	19,6
stopień plastyczności / liquidity index [%]					0,92	0,69
straty prażenia / ignition losses [%]					27	28,5

Próby oznaczenia granicy plastyczności popiołów nie przyniosły pozytywnych efektów – nie dają się one waleczkować. Również próby oznaczenia granicy płynności były niepomysłne – bruzda w miareczce aparatu Cassagrande'a zlewa się, nie obserwuje się płynięcia materiału. Wskazuje to, że popioły nie wykazują plastyczności takiej jaką charakteryzują się grunty spoiste o zbliżonym uziarnieniu. Można wnosić, że wynika to ze zróżnicowanej budowy wewnętrznej i zewnętrznej cząstek popiołu (zamknięte pory, cząstki z uwieczonym gazem, tzw. cenosfery).

Oznaczenia granic konsystencji szlamów poflotacyjnych przyniosły pozytywne efekty. Granica plastyczności wynosiła 21–23%, a granica płynności 41–43% (tab. 1). Wartość stopnia plastyczności ($I_p = 20\%$) pozwala zakwalifikować te materiały do gruntów zwięzłospoistych, wykazujących wyraźne właściwości plastyczne.

WODOPRZEPUSZCZALNOŚĆ

Popioły lotne charakteryzują się wartościami współczynnika filtracji od $9,8 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,85$) do $3,3 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (przy $I_s = 0,95$) (tab. 1). Odpowiada to naturalnym gruntom spoistym.

Szlamy poflotacyjne odznaczają się znacznie mniejszymi wartościami współczynnika filtracji niż popioły, przy czym są one wyraźnie zależne od zagęszczenia. Wraz ze zwiększeniem wskaźnika zagęszczenia od $I_s = 0,85$ do 1,00 wartości współczynnika filtracji zmniejszały się od $1,9 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ do $3,4 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Wartości te odpowiadają gruntom spoistym i bardzo spoistym.

WILGOTNOŚĆ OPTYMALNA I MAKSYMALNA GĘSTOŚĆ OBJĘTOŚCIOWA SZKIELETU

Parametry charakteryzujące zagęszczalność popiołów, to jest wilgotność optymalna i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu, wykazują pewne zróżnicowanie w zależności od miejsca pochodzenia (tab. 1). Szlamy poflotacyjne wykazują wyraźnie większą gęstość objętościową szkieletu niż popioły, natomiast ich wilgotność optymalna jest zbliżona do niektórych popiołów, np. z elektrowni Rybnik lub z elektrociepłowni Kraków.

ANALIZA PRZYDATNOŚCI BADANYCH MATERIAŁÓW DO USZCZELNIANIA NASYPÓW HYDROTECHNICZNYCH

W odniesieniu do uziarnienia gruntów spoistych, stosowanych na elementy szczelne w nasypach hydrotechnicznych, wymaga się, aby zawartość cząstek mniejszych od 0,01 mm była większa od 25%, jeśli są one stosowane do elementów cienkościennych. Natomiast do elementów szerokich dopuszcza się grunty, w których zawartość cząstek o średnicy $0,01 > d > 0,005 \text{ mm}$ jest mniejsza od 25% i które mogą zawierać kamienie i okruchy skalne [Sobczak 1975].

Biorąc powyższe pod uwagę, można przyjąć, że badane popioły oraz szlamy poflotacyjne o zawartości cząstek o $d < 0,01$ mm wynoszącej odpowiednio ponad 30% i 40%, przy braku dużych okruchów, spełniają wymagania stawiane materiałom na elementy uszczelniające w nasypach hydrotechnicznych.

Plastyczność charakteryzuje spistość, od której zależy urabialność materiału. Doświadczenia z praktyki inżynierskiej wskazują, że grunty o $I_p = 7-10\%$ dobrze się zagęszczają, co pozwala uzyskać małą przepuszczalność hydrauliczną ($< 10^{-9}$ m·s⁻¹). Grunty o zbyt małej lub zbyt dużej plastyczności są trudno zagęszczalne, co nie pozwala uzyskać odpowiedniej przepuszczalności hydraulicznej [Garbulewski 2000]. Odnosząc do powyższego wyniki badań popiołów, można stwierdzić, że nie wykazują one cech plastyczności pomimo drobnego uziarnienia, co jest wynikiem skomplikowanej mikrostruktury cząstek popiołu [Ratajczak i in. 1999]. Dotychczasowe doświadczenia uzyskane przy formowaniu wykładzin uszczelniających w technologii krzemianowania popiołów [Główka i in. 1982; Quant 1997] wskazują, że popioły mogą być przydatne do uszczelnień.

Szlamy poflotacyjne charakteryzują się dużą plastycznością ($I_p = 20-27\%$), która jednak nie nastęrcza problemów przy formowaniu uszczelnień. Wykazały to doświadczenia uzyskane przy uszczelnianiu dna i skarp wyrobiska popiaskowego, wykorzystanego następnie do zwałowania odpadów powęglowych. Zagęszczając szlamy poflotacyjne o wilgotności optymalnej ciężkim walcem statycznym gładkim, uzyskano korzystne efekty ($I_s = 0,94-0,98$) [Kawalec, Kawalec 1995].

Wodoprzepuszczalność popiołów jest stosunkowo mała. Wartość współczynnika filtracji rzędu 10^{-7} m·s⁻¹ pozwala zakwalifikować materiał jako przydatny do uszczelnień. Wodoprzepuszczalność szlamów poflotacyjnych jest o rząd wielkości mniejsza od wodoprzepuszczalności popiołów (przy zbliżonym zagęszczeniu).

Zagęszczalność popiołów jako materiałów różno- i bardzo różnoziarnistych ($U = 6,5-17,6$) przy wilgotności optymalnej jest dobra. Również zagęszczalność szlamów poflotacyjnych jest dobra – przy wilgotności optymalnej.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone analizy wykazały, że popioły lotne oraz szlamy poflotacyjne z węgla kamiennego mogą stanowić materiał do uszczelnień. Zastosowanie ich do formowania przesłon uszczelniających w wałach przeciwpowodziowych wiąże się z koniecznością zachowania odpowiednich warunków dotyczących technologii oraz określenia wpływu na środowisko wodne.

W przypadku zastosowania do uszczelnień popiołów lotnych należy je doprowadzić do wilgotności optymalnej, przy której można najłatwiej osiągnąć duże zagęszczenie ($I_s \geq 0,95$), zapewniające małą wodoprzepuszczalność ($k = 10^{-7}$ m·s⁻¹). Popioły świeże pobierane ze zbiorników retencyjnych mają

zwykle niską wilgotność. Dlatego należy je dowilgocić, stosując odpowiednią ilość wody i mieszając, aby osiągnęły wilgotność optymalną. Wymywalność chlorków, siarczanów, azotanów oraz metali ciężkich zwykle nie przekracza wartości dopuszczalnych, określonych dla ścieków wprowadzanych do wód i do ziemi. Wartość dopuszczalna przekracza natomiast odczyn popiołów ($\text{pH} = 10\text{--}11$), gdyż są one silnie alkaliczne. Ze względu jednak na to, że przesłona jest formowana w obrębie nasypu ziemnego i nie podlega bezpośredniemu oddziaływaniu czynników atmosferycznych i wody, nie powinno to stanowić zagrożenia dla środowiska wodnego. Należy również wziąć pod uwagę, że główną rolę w ograniczaniu wymywania większości rozpuszczalnych składników popiołów odgrywa ich krzemianowanie (tworzenie zagęszczonych kompozytów krzemianowo-popiołowych) [Quant 1997].

W przypadku zastosowania do uszczelnień szlamów poflotacyjnych z węgla kamiennego należy je dokładnie wymieszać, aby uzyskać materiał o jednolitym uziarnieniu i jednakowej wilgotności. Szlamy poflotacyjne w osadnikach mają zróżnicowaną wilgotność, niekiedy dużo większą od optymalnej, przez co materiał jest w stanie miękkoplastycznym. Powoduje to konieczność przesuszenia materiału do stanu twaroplastycznego, to jest do wilgotności wynoszącej nie więcej niż $w_{\text{opt}} + 2\%$. Przy tej wilgotności można stosunkowo łatwo osiągnąć duże zagęszczenie ($I_s \geq 0,95$) i małą wodoprzepuszczalność ($k = 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Wyniki badań chemicznych szlamów poflotacyjnych z procesu wzbogacania węgla kopalni „Krupiński” wykazały, że nie zawierają one detergentów, wykazują małą rozpuszczalność w wodzie i roztworach wodnych o odczynie kwaśnym i zasadowym; również związki wapnia, glinu i żelaza, a także siarczki, azotany i azotyny nie ulegają wymywaniu przez wodę [Kawalec, Kawalec 1995]. Wyniki te stanowiły podstawę dopuszczenia szlamów poflotacyjnych do formowania warstw uszczelniających na składowiska odpadów powęglowych.

Należy jednak zwrócić uwagę na stosunkowo dużą zawartość substancji węglowej (od kilku do 30%) i siarki całkowitej (zwykle ponad 1%). Można wnosić, że negatywne oddziaływanie tych składników na środowisko wodne, w przypadku stosowania szlamów poflotacyjnych do warstw uszczelniających, będzie znacznie ograniczone ze względu na formowanie ich wewnątrz nasypu ziemnego, to jest przy braku bezpośredniego kontaktu z czynnikami atmosferycznymi i wodą.

W wyniku przeprowadzonych badań i analiz można wyprowadzić następujące wnioski:

1. Popioły lotne oraz szlamy poflotacyjne z węgla kamiennego mogą stanowić materiały alternatywne w stosunku do gruntów spoistych, przydatne do budowy przesłon uszczelniających w wałach przeciwpowodziowych.

2. Warunkiem zastosowania tych materiałów do uszczelnień jest zachowanie odpowiednich wymogów technologicznych dotyczących głównie zachowania odpowiedniej wilgotności i zagęszczenia materiału dla uzyskania małej wodoprzepuszczalności.

3. Wskazane i celowe jest prowadzenie kontrolnego monitorowania stanu środowiska wodnego w rejonie obwałowania uszczelnionego popiołami lub szlamami poflotacyjnymi, co ma na celu określenie dynamiki ewentualnych zmian jakości wód powierzchniowych i gruntowych w okresie wezbrań powodziowych i po przejściu kulminacyjnej fali.

BIBLIOGRAFIA

- Batog A., Machajski J. *Uwarunkowania geotechniczne katastrofy obwałowania Stawu Starzyckiego w Tomaszowie Mazowieckim*. XXX ZSMGiG – Geotechnika w budownictwie i górnictwie. Prace Nauk. IGiH Polit. Wrocławskiej nr 76, s. Konferencje nr 42, 2007, s. 53–60.
- Czyżewski K., Wolski W., Wójcicki S., Żbikowski A. *Zapory ziemne*. Arkady Warszawa 1973.
- Garbulewski K. *Dobór i badania gruntowych uszczelnień składowisk odpadów komunalnych*. SGGW, Warszawa 2000.
- Główka W., Kuziemska I., Nowak J., Quant B., Kałęcki H., Knop M., Szymański K. *Problem węzłowy 01.3. Kompleksowe wykorzystanie kopalni stałych oraz odpadów kopalnianych i surowców wtórnych z kopalni. Temat 01.3.13. Zastosowanie popiołów do powierzchniowego uszczelniania gruntów i budowli hydrotechnicznych*. PAN, Inst. Bud. Wod., maszynopis, Gdańsk 1982.
- Głuszkiewicz A. *Metody uszczelniania wałów przeciwpowodziowych – doświadczenia*. Gosp. Wod. nr 4, 2000, s. 150–154.
- Kawalec B., Kawalec J. *Odpady kopalniane jako warstwa uszczelniająca składowisk odpadów przemysłowych*. Zesz. Nauk. Polit. Śląskiej, Budownictwo nr 81, 1995, s. 447–458.
- PN-86/B-02480. *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów*.
- Podstawy techniczne modernizacji wałów przeciwpowodziowych i renaturyzacji małych rzek*. Red. Borys M. IMUZ, Falenty 2005.
- Quant B. *Silikatyzacja popiołów lotnych i fosfogipsów – bezpieczna dla środowiska metoda utylizacji odpadów*. Zesz. Nauk. Polit. Gdańskiej nr 557, Bud. Wod. 1997.
- Ratajczak T., Gawel A., Górniak K., Muszyński M., Szydłak T., Wyszomirski P. *Charakterystyka popiołów lotnych ze spalania niektórych węgla kamiennych i brunatnych*. Mat. Sesji Nauk. „Masy popiołowo-mineralne i ich wykorzystanie w górnictwie węglowym”. Pol. Tow. Mineralog., 9–34. Kraków 1999.
- Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska i Zasobów Naturalnych z dnia 24.07.2006 r. w sprawie warunków, jakie należy spełniać przy wprowadzaniu ścieków do wód lub ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego*. Dz.U. nr 137, poz. 984, tab. II.
- Sobczak J. *Zapory z materiałów miejscowych*. PWN, Warszawa 1975.

Dr hab. inż. Eugeniusz Zawisza
Akademia Rolnicza
Zakład Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziemnego
30-059 Kraków
al. Mickiewicza 24/28
tel.: 0 12 633-90-98
e-mail: kmgibz@ar.krakow.pl

Recenzent: Dr hab. inż. Jan Kępmiński (Prof. UP)