

Bogdan KAWALEC, Zenobia KOPKA,
Andrzej SOCZAWA

PRZYDATNOŚĆ MIESZANEK POPIOŁOWO-ŻUŹŁOWYCH Z ELEKTROWNI ŁAZISKA DO NASYPÓW DROGOWYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań popiołów i żużli energetycznych oraz ich mieszanek. Dokonano analizy możliwości ich wykorzystania do robót drogowych.

1. WSTĘP

Większe zainteresowanie odpadami elektrownianymi, powstałymi przy spalaniu węgla kamiennego, obserwuje się u nas w Kraju od ok. 10 lat. Badania odpadów tego typu prowadzone były w tym czasie głównie przez Instytut Dróg i Mostów Politechniki Warszawskiej [6], [9], Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Uniwersytetu Warszawskiego [4], [5], Instytut Nadawczy Dróg i Mostów w Warszawie (poprzednio COBiRTD) [11], [21], [22], Zakład Doświadczalny Utylizacji Odpadów Elektrownianych w Katowicach [2], [12], [15], Zakład Geotechniki Instytutu Budowy Dróg Politechniki Śląskiej w Gliwioch [1], [7] i inne placówki naukowo-badawcze.

Odpady elektrowniane to głównie popioły lotne. Stanowią one produkt uboczny procesu spalania miazgi węglowej w paleniskach bezrusztowych. Starsze elektrownie, bazujące głównie na paleniskach rusztowych, dostarczały jako produkt uboczny żużle paleniskowe. Na zwałowiskach starszych dolne partie stanowią z reguły żużle paleniskowe, górną partię zwału budują natomiast popioły lotne. Wśród żużli spotyka się również soczewki i prze-warstwienia materiału przepalonego. Taka budowa starych zwałowisk utrudnia niejednokrotnie w znacznym stopniu ich eksploatację.

W latach 1979-80 były prowadzone przez Zakład Geotechniki Politechniki Śląskiej badania materiałów zgromadzonych na suchej hałdzie Elektrowni Łaziska, pod kątem ich przydatności do robót inżyniersko-drogowych. Potrzeba ta wynika z deficytu naturalnych gruntów stosowanych tradycyjnie do tych celów.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA BADANYCH ODPADÓW

Średni roczny przyrost odpadów Elektrowni Łaziska wynosi 848 tys. ton, w tym 702 tys. ton popiołów i 14 tys. ton żużli. Na suchej hałdzie Elek-

trowni laziska zgromadzono ok. 2300 tys. ton popiołu i żużla. Odpady budujące hałdę to:

- popioły,
- żużle nieprzepracowane,
- żużle przepracowane.

Przeprowadzone badania makroskopowe wykazały, że zarówno popioły, jak i żużle cechuje budowa agregatowa, charakteryzująca się dużą porowatością. Cząstki ziarna mają budowę pumeksovą lub zwięzłą i najczęściej ostrokrawędzisty kształt. Przeciętny skład chemiczny badanych odpadów przedstawia się następująco: SiO_2 - 46,6%, Al_2O_3 - 25,4%, Fe_2O_3 - 8,8%, CaO - 2,7%, MgO - 1,6%, SO_2 - 1,3%, straty prażenia i inne 13,6%.

Dotychczasowe doświadczenia w zakresie stosowania odpadów elektrownianych do budowy nasypów wskazują, iż najdogodniej jest stosować mieszaniny popiołowo-żużlowe. Badania wykonano więc dla podstawowych typów odpadów oraz następujących mieszanek:

- 25% popiołu + 75% żużla nieprzepracowanego,
- 50% popiołu + 50% żużla nieprzepracowanego,
- 25% popiołu + 75% żużla przepracowanego,
- 50% popiołu + 50% żużla przepracowanego.

Zasadniczym celem badań było określenie parametrów decydujących o przydatności odpadów do budowy górnych i dolnych warstw nasypów drogowych. Badania te poprzedzone zostały rozpoznaniem podstawowych cech geotechnicznych, tj. składu granulometrycznego, strat prażenia, gęstości właściwej, zagęszczalności, wodoprzepuszczalności i kapilarności biernej oraz oporu na ścinanie. Średnie wartości tych parametrów zestawiono w tabl. 1.

Badania wykazały, że żużle pod względem uziarnienia odpowiadają gruntom gruboziarnistym (żwir, pospółki), a popioły gruntem drobnoziarnistym (pyły piaszczyste). Spreparowane mieszanki popiołowo-żużlowe posiadają uziarnienie zbliżone do pospółek.

Badania strat prażenia wykazały, że zawartość węgla i części palnych jest największa w popiołach i wynosi ok. 10%. Praktyka wskazuje, iż przy takiej zawartości części palnych nie następuje zjawisko samozapłonu.

Gęstość właściwa popiołów w porównaniu z gruntami naturalnymi jest znacznie niższa. Również nieco niższe wartości uzyskano dla żużli nieprzepracowanych. Gęstość właściwa żużli przepracowanych zbliżona jest do wartości odpowiadających gruntom bardzo spójnym, a dla mieszanek maleje wraz ze wzrostem dodatku popiołu.

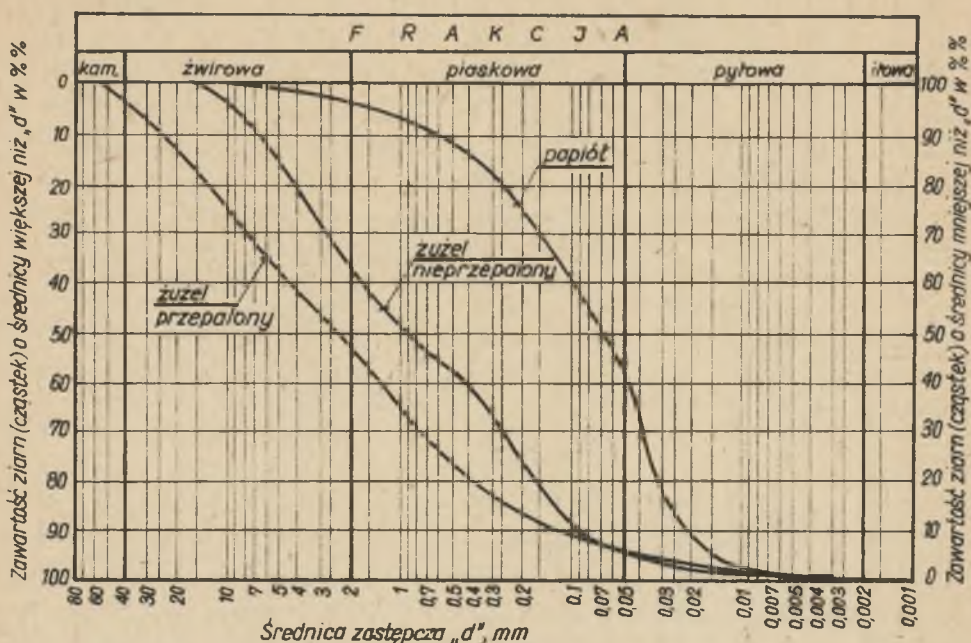
Stosunkowo niska wartość maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu odpadów czyni je szczególnie przydatne do formowania nasypów na podłożach słabonośnych.

Wilgotność naturalna odpadów hałdowych różni się najczęściej od wartości wilgotności optymalnych, uzyskiwanych w badaniach laboratoryjnych. W przypadku popiołów i żużli przepracowanych zachodzi zazwyczaj konieczność

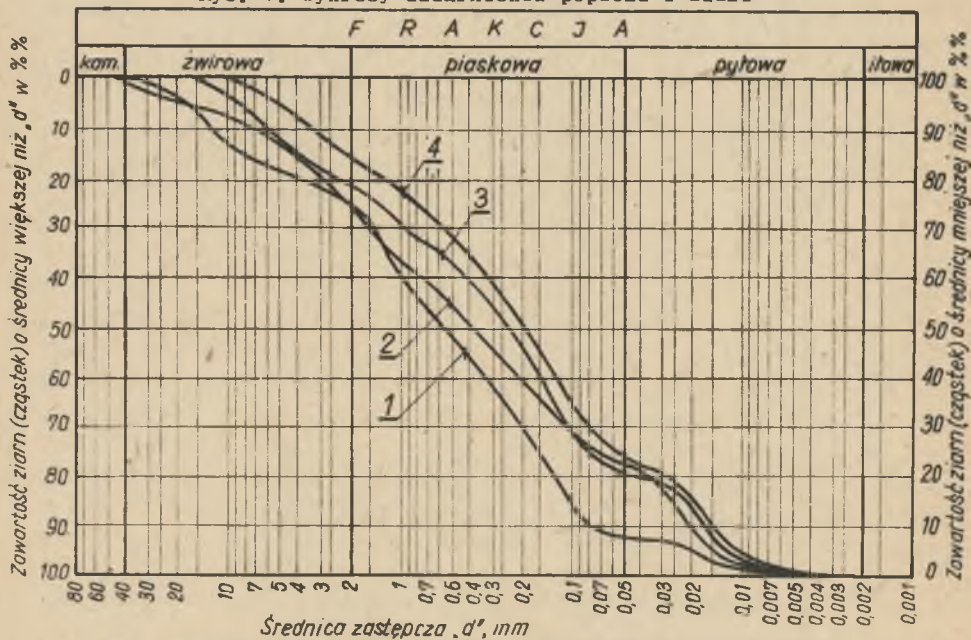
Tablica 1

Średnie wartości podstawowych parametrów geotechnicznych

Rodzaj odpadów	Skład granulometryczny				Straty prze- nia [%]	Gęstość właściwa ρ_s [g/cm ³]	Zagęszczalność		Wodoprze- puszczalność k_{10} [cm/s]	Kapi- larność bierna H_{kb} [m]	ϕ_u [°]	c_u [kPa]	
	40-10 [%]	10-2 [%]	2-0,05 [%]	<0,05 [%]			ρ_{ds} [g/cm ³]	w_{opt} [%]					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Żużel przepalony	24,82	26,98	41,40	6,8	35	2,9	2,75	1,25	32,5	$1,1 \cdot 10^{-2} - 1,2 \cdot 10^{-3}$	0,49	43	22
Żużel nieprzepalony	5,26	30,62	57,22	6,9	15	4,6	2,59	1,33	24,1	$4,1 \cdot 10^{-2} - 7,5 \cdot 10^{-5}$	0,69	42	10
Popioły	1,56	3,88	50,78	43,8	5,4	10,4	2,26	1,06	45,8	$4,7 \cdot 10^{-4} - 7,6 \cdot 10^{-5}$	2,0	36	10
25% popiołu + 75% żuźla przepalonego	13,20	10,90	67,20	8,1	12,5	-	2,63	1,20	34,0	$1,1 \cdot 10^{-2} - 1,3 \cdot 10^{-4}$	0,83	42	15
50% popiołu + 50% żuźla przepalonego	7,80	16,40	53,70	22,1	39,1	-	2,51	1,13	33,3	$1,2 \cdot 10^{-4} - 9,4 \cdot 10^{-4}$	1,32	39	10
25% popiołu + 75% żuźla nieprzepalonego	3,80	17,90	57,50	20,8	24,7	-	2,51	1,26	25,0	$1,3 \cdot 10^{-2} - 6,0 \cdot 10^{-4}$	1,08	38	10
50% popiołu + 50% żuźla nieprzepalonego	0,30	16,10	60,40	23,2	22	-	2,43	1,15	23,6	$7,0 \cdot 10^{-4} - 7,9 \cdot 10^{-5}$	1,71	57	10

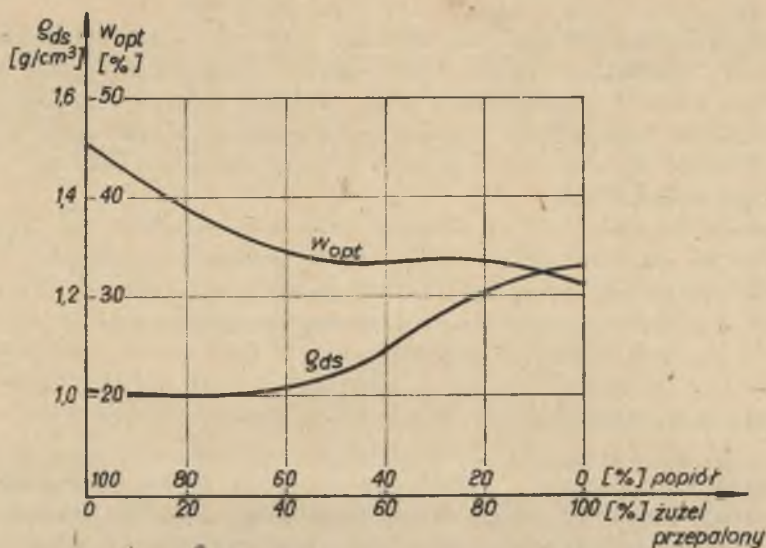


Rys. 1. Wykresy uziarnienia popiołu i żużli

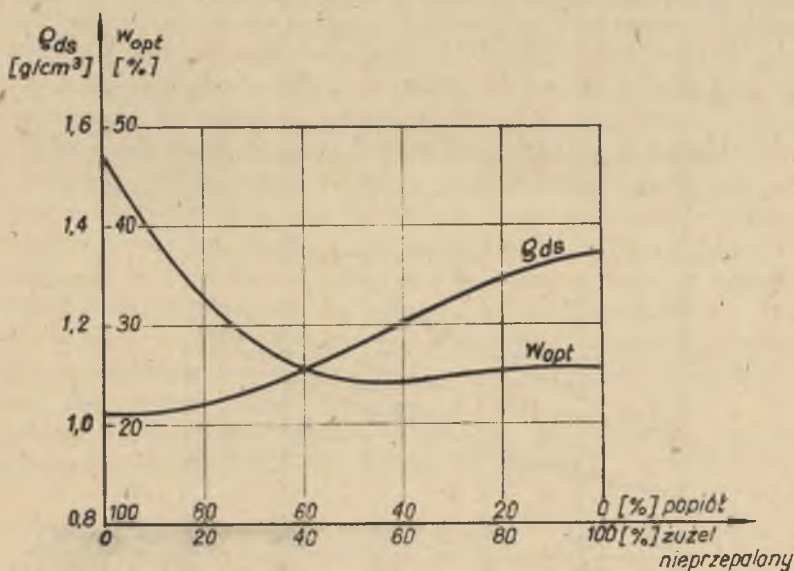


Rys. 2. Wykresy uziarnienia mieszanek popielowo-żużliwych

1 - 25% popiołu + 75% żużla przepalonego, 2 - 50% popiołu + 50% żużla przepalonego, 3 - 25% popiołu + 75% żużla nieprzepalonego, 4 - 50% popiołu + 50% żużla nieprzepalonego



Rys. 3. Wyniki badań w_{opt} i Q_{ds} dla popiołu i żużla przepalonego oraz ich mieszanek



Rys. 4. Wyniki badań w_{opt} i Q_{ds} dla popiołu i żużla nieprzepalonego oraz ich mieszanek

zwiększenia wilgotności materiału przed jego wbudowaniem w nasyp. Żużle nie-przepalone z kolei trzeba najczęściej nieco podsuszyć.

Wodoprzepuszczalność popiołów zbliżona jest do wodoprzepuszczalności pyłów. Żużle przepalone cechami filtracyjnymi odpowiadają piaskom drobnym i pylastym, a żużle nieprzepalone pyłom, piaskom drobnym i pylastym.

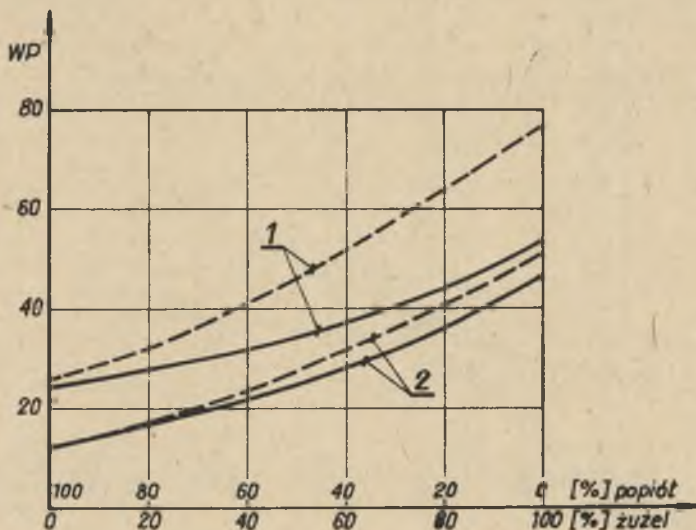
Ped względem kapilarności biernej żużle można traktować jako materiał niewysadzinowy, popioły oraz mieszanki z zawartością 50% popiołu należy uważać jako wysadzinowe.

Parametry wytrzymałości na ścinanie zbadanych odpadów i ich mieszanek są większe od odpowiadających im parametrów gruntów naturalnych. W stanie powietrzno-suchym zachowują się jak grunty niespoiste, natomiast wraz ze wzrostem wilgotności wykazują nieznaczną spoistość.

3. BADANIA SPECJALISTYCZNE

O przydatności gruntów i odpadów przemysłowych do budowy nasypów drogowych decydują w głównej mierze wyniki następujących badań: wskaźnika piaskowego, mrozoodporności, wysadzinowości, kalifornijskiego wskaźnika nośności, modułów odkształcenia i sprężystości. Rezultaty przeprowadzonych badań w tym zakresie są następujące:

Wskaźnik piaskowy przed i po 5-krotnym ubiciu w aparacie Proctora, jako funkcję składu mieszanek popiołu i żużli, przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Wskaźnik piaskowy przed i po 5-krotnym ubiciu w aparacie Proctora
 1 - przed ubiciem, 2 - po 5-krotnym ubiciu (—) żużel nieprzepalony, (---) żużel przepalony

Uzyskane dla popiołów średnie wartości wskaźnika piaskowego (24,2%) wskazują, że są one materiałem złym lub wątpliwym w zastosowaniu do podłoża nawierzchni drogowych, nie nadają się one również do budowy górnych warstw nasypów i warstw mrozochronnych w wykopach. Żuźle przepalone i nieprzepalone, charakteryzujące się średnimi wartościami wskaźnika piaskowego odpowiednio 78,3% i 53,9%, mogą stanowić podłoże nawierzchni drogowych oraz są przydatne do dolnych i górnych warstw nasypów i warstw mrozochronnych w wykopach. Dodatek popiołu do żuźli zawęża przydatność powstającego w ten sposób materiału do robót drogowych. Na górne warstwy nasypów nadają się jedynie żuźle przepalone z zawartością do 25% popiołu. Pozostałe mieszanki mogą być stosowane jedynie do budowy dolnych warstw nasypów.

Badania mrozoodporności przeprowadzone na próbkach żuźli przepalonych i nieprzepalonych metodą bezpośrednią wykazały, iż żuźel przepalony nadaje się na górne warstwy nasypów i warstwy ochronne w wykopach. Żuźle nieprzepalone, jak wykazały badania, są do tych celów nieprzydatne.

Wysadzinowość przedmiotowych odpadów i ich mieszanek określono na podstawie przeprowadzonych laboratoryjnych badań pęcznienia mrozowego oraz według gruntowych kryteriów Z. Wiluna [20] i S. Rolli [16].

Badania pęcznienia mrozowego wykonano na próbkach o uziarnieniu 0-12 mm, czyli na frakcji decydującej o wielkości ssania i migracji wody do strefy zamarzania, a tym samym wielkości pęcznienia mrozowego. Do badań wykorzystano aparaturę skonstruowaną w Zakładzie Geotechniki Politechniki Śląskiej [19]. Proces wysadzinowości badanych odpadów i ich mieszanek realizowano poprzez umieszczenie próbek w komorach chłodniczych, w których poddawane były działaniu ujemnej temperatury, równej -10°C , stałej przez cały czas badania. Złożona wokół pojemników z próbkami boczna izolacja termiczna zapewniała kierunek przemarzania od powierzchni górnej do wnętrza próbki. Zapewniony, stały kontakt niezamrażonej wody z dnem próbki (tzw. otwarty system gruntowo-wodny) modeluje najniekorzystniejsze pod względem wysadzinowości warunki naturalne, w których granica przemarzania znajduje się w obrębie strefy kapilarnego podciągania wody. Próbki w kształcie walca, o wymiarach $d = 120$ mm i $h = 200$ mm, umieszczone były w segmentowych pojemnikach, które umożliwiały im swobodne odkształcanie się w kierunku pionowym. Badania pęcznienia mrozowego odpadów, o wilgotności zbliżonej do optymalnej i zagęszczanych wg metody normalnej Proctora, prowadzono w sposób ciągły przez okres jednego miesiąca.

Pęcznienie mrozowe, jako jeden z parametrów określających wysadzinowość przemarzającego ośrodka, wyraża się zależnością:

$$P_m = \frac{\Delta h}{h} \cdot 100 [\%], \quad (1)$$

gdzie:

Δh - przyrost początkowej wysokości h badanej próbki.

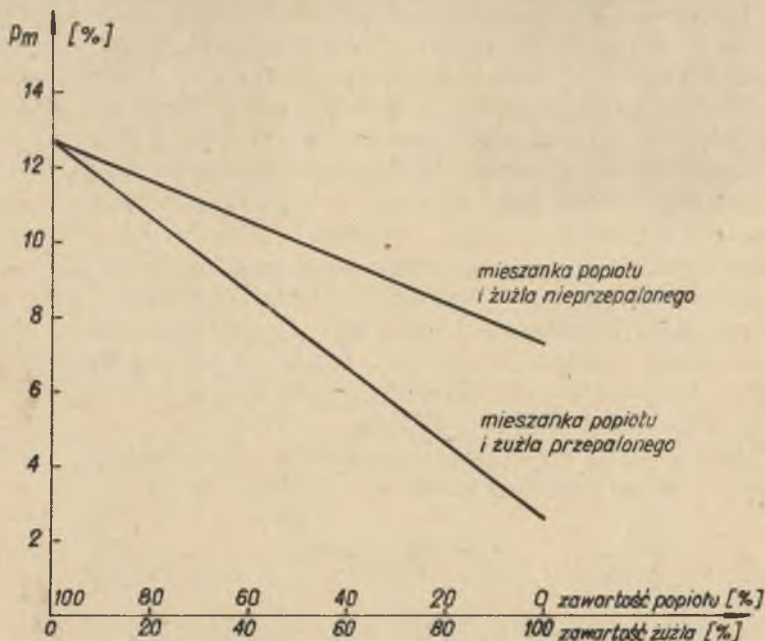
Rezultaty przeprowadzonych badań wykazały następujące maksymalne wartości pęcznienia mrozowego zbadanych odpadów i ich mieszanek:

- $p_m = 12,7\%$ - dla popiołu,
- $p_m = 6,5\%$ - dla żużla nieprzepalonego,
- $p_m = 2,7\%$ - dla żużla przepalonego,
- $p_m = 9,2\%$ - dla mieszanki 25% popiołu + 75% żużla nieprzepalonego,
- $p_m = 10,0\%$ - dla mieszanki 50% popiołu + 50% żużla nieprzepalonego,
- $p_m = 5,5\%$ - dla mieszanki 25% popiołu + 75% żużla przepalonego,
- $p_m = 7,9\%$ - dla mieszanki 50% popiołu + 50% żużla przepalonego.

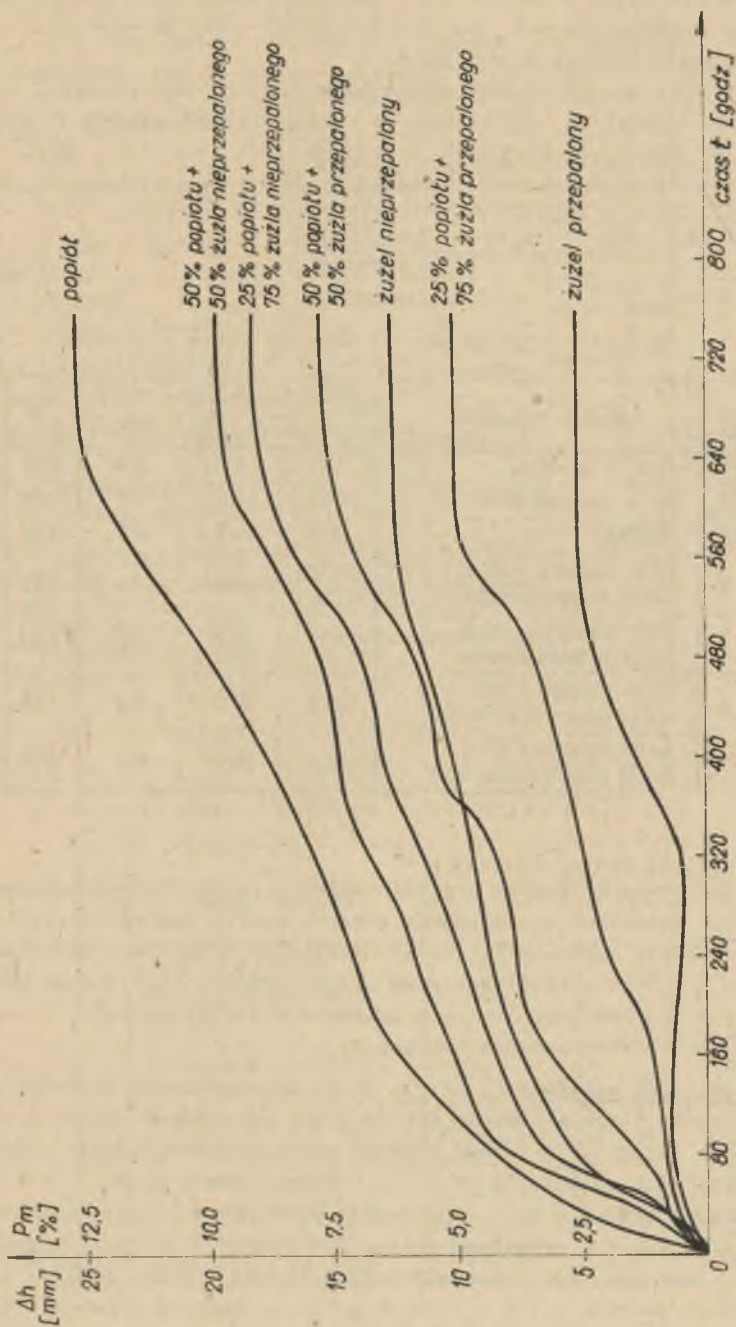
Wartości pęcznienia mrozowego zbadanych popiołów, żużla nieprzepalonego oraz mieszanek popiołowo-żużlowych są podobnego rzędu, jak pęcznienia mrozowe wysączynowych gruntów mało spoiistych, badanych w podobnych warunkach laboratoryjnych [13], [14], [18]. Jedynie pęcznienia mrozowe żużla przepalonego można uznać za odpowiadające drobnoziarnistym gruntom niespoistym (piaski drobne i pylaste) [14].

Krzywe obrazujące przebieg pęcznienia mrozowego odpadów w czasie przedstawia rys. 6. Wynika z niego, że stabilizacja pęcznienia mrozowego zbadanych odpadów i ich mieszanek, w zakresie zrealizowanego programu badań, następuje po upływie 23-27 dni od momentu rozpoczęcia mrożenia. Dalsze zamrażanie próbek nie powoduje istotnego wzrostu pęcznienia mrozowego.

Zależność maksymalnego pęcznienia mrozowego od składu mieszanek popiołu z żużlem nieprzepalonym i przepalonym ilustruje rys. 7.



Rys. 7. Maksymalne pęcznienie mrozowe mieszanek popiołowo-żużlowych



Rys. 6. Krzywe pęcznienia mrozonego odpadów i ich mieszanek

Badania wykazały, że pęcznienie mrozowe mieszanki popiołu i żużla rośnie wprost proporcjonalnie (zależność liniowa) wraz ze wzrostem ilości popiołów w przedmiotowych mieszankach.

Na podstawie wyników badań składu uziarnienia i kapilarności biernej dokonano oceny stopnia wysadzinowości przedmiotowych odpadów i ich mieszanek, według gruntowych kryteriów Z. Wiluna [20] i S. Rolli [16]. Charakterystyczne dla tych kryteriów parametry właściwości fizycznych zbadanych materiałów podano w tabelicy 2.

Tabela 2

Parametry wysadzinowości odpadów i ich mieszanek

Lp.	Rodzaj odpadów	Zawartość % ziarn i cząstek			H_{kb} [m]
		< 0,075 mm	< 0,05 mm	< 0,02 mm	
1	Żużel przepalony	7,0	6,8	5,0	0,49
2	Żużel nieprzepalony	5,3	4,0	2,7	0,69
3	Popioły	50,0	44,0	8,0	2,00
4	25% popiołu + 75% żużla przepalonego	9,0	8,5	5,0	0,83
5	50% popiołu + 50% żużla przepalonego	27,3	25,0	12,0	1,32
6	25% popiołu + 75% żużla nieprzepalonego	23,6	21,0	13,0	1,08
7	50% popiołu + 50% żużla nieprzepalonego	26,1	22,9	10,0	1,71

Oceniono również stopień wysadzinowości oraz przydatność zbadanych odpadów i ich mieszanek do wykonania górnych warstw nasypów drogowych poprzez porównanie uzyskanych z badań maksymalnych wartości pęcznienia mrozowego (p_m) z wartościami wskaźnika wysadzinowości (w_m) J. Pachowskiego [11]. Rezultaty przeprowadzonych ocen w zakresie wysadzinowości i przydatności zbadanych materiałów zawiera tabela 3.

Kalifornijski wskaźnik nośności. Do badań wskaźników nośności przedmiotowych odpadów i ich mieszanek wykorzystano aparat wyposażony w cylinder o objętości $2,2 \text{ dm}^3$, za pomocą którego możliwe było badanie ziarn odpadów o średnicach mniejszych od 20 mm. Badania przeprowadzono na próbkach zagęszczanych wstępnie przy wilgotności optymalnej z energią równą 0,95 energii stosowanej w normalnej próbie Proctora. W trakcie przygotowania próbek i ich penetracji stosowano nadwagę równą 4,5 kg. Zmiany wilgotności badanych odpadów i ich mieszanek osiągnęto poprzez nasycając wodą wstępnie zagęszczonych próbek w czasie 2, 4 i 6 dób. W procesie moczenia próbek nie zdołano uzyskać wilgotności badanych materiałów powyżej wilgotno-

Tablica 3

Stopień wysadzinowości odpadów i ich mieszanek

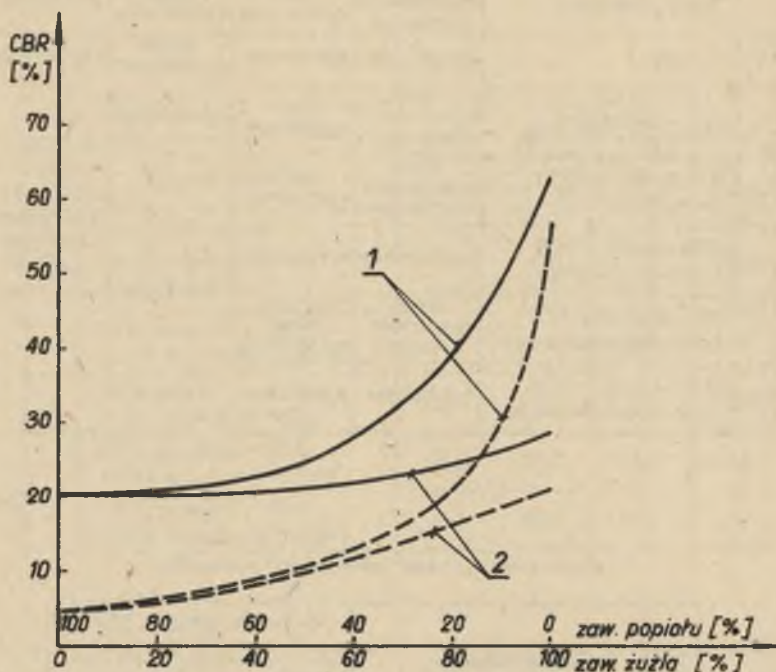
Lp	Rodzaj odpadów	Stopień wysadzinowości wg kryterium			Przydatność do wykonania górnych warstw nasypów drogow.
		Z Wituna	S. Rolli	J Pachowskiego	
1	2	3	4	5	6
1	Żużel przepalony	mato wysadzinowy (wątpliwy)	nie-wysadzinowy	mato wysadzinowy	przydatny
2	Popioły	wysadzinowe	wysadzinowe	bardzo wysadzinowe	nieprzydatne
3	Żużel nieprzepalony	mato wysadzinowy (wątpliwy)	nie-wysadzinowy	wysadzinowy	przydatne pod warunkiem wykonania warstwy mrozo-ochronnej
4	25% popiołu + 75% żuźla przepalonego	mato wysadzinowe (wątpliwe)	nie-wysadzinowe	wysadzinowe	
5	50% popiołu + 50% żuźla przepalonego	wysadzinowe	wysadzinowe		
6	25% popiołu + 75% żuźla nieprzepalonego	mato wysadzinowe (wątpliwe)	wątpliwe (mato wysadzinowe)		
7	50% popiołu + 50% żuźla nieprzepalonego	wysadzinowe	wysadzinowe		

Tablica 4

Charakterystyczne wskaźniki nośności

Lp.	Rodzaj odpadów	Wskaźnik nośności $CBR_{(3,0)}$ [%]	
		dla $w = w_{opt}$	dla $w = w_1$
1	Żużel przepalony	28,5	21,2
2	Żużel nieprzepalony	62,4	57,0
3	Popioły	20,8	4,5
4	25% popiołu + 75% żuźla przepalonego	25,5	14,3
5	50% popiołu + 50% żuźla przepalonego	21,0	13,0
6	25% popiołu + 75% żuźla nieprzepalonego	39,0	20,8
7	50% popiołu + 50% żuźla nieprzepalonego	24,9	11,0

ści miarodajnej (w_1), odpowiadającej $0,96 Q_{ds}$, według normalnej próby Proctora [17], [8]. Stąd w ocenie wskaźników nośności przyjęto operować ich wartościami odpowiadającymi wilgotności optymalnej (w_{opt}) i miarodajnej (w_1). W tabelicy 4 przedstawiono, odpowiadające tym wilgotnościom, wartości wskaźników nośności CBR zbadanych odpadów i ich mieszanek. Rezultaty badań wskaźników nośności CBR jako funkcji składu mieszanek popiołowo-żużlowych, przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Wskaźniki nośności mieszanek popiołowo-żużlowych
 1 - popiół + żużel nieprzepalony, 2 - popiół + żużel przepalony (—) dla $w = w_{opt}$, (----) dla $w = w_1$

Z przeprowadzonych badań wynika, że największe wartości kalifornijskich wskaźników nośności (62,4% dla w_{opt} i 57,0% dla w_1) uzyskano dla żużli przepalonych, a najmniejsze wskaźniki nośności (20,8% dla w_{opt} i 4,5% dla w_1) posiadały popioły. Ponadto wskaźniki nośności mieszanek popiołowo-żużlowych wyraźnie maleją wraz ze wzrostem w ich składzie zawartości popiołów.

Przy ocenie wskaźników nośności zbadanych odpadów i ich mieszanek za płaszczyznę odniesienia przyjęto klasyfikację gruntów dla celów drogowych według Z. Wiluna [20]. Żużel nieprzepalony charakteryzują wartości wskaźników nośności CBR odpowiadające pospółkom i zwirom. Żużel przepalony pod

względem wskaźnika nośności (28,5% przy w_{opt} i 21,2% przy w_1) odpowiada płaskom grubym i średnim rzeczonym. Wskaźniki nośności zbadanych popiołów można porównywać z gruntami mało i średnio spójnymi. Natomiast zbadane mieszanki popiołowo-żużlowe charakteryzują się pośrednimi wartościami wskaźników nośności między popiołami a żużlem przepalonym bądź nieprze-palonym.

Pęcznienie zbadanych odpadów i ich mieszanek, wskutek nasycenia wodą, wahało się w granicach 0,0-1,6%.

Moduły odkształcenia i sprężystości. Badanie modułów odkształcenia pierwotnego (M_E), wtórnego (\bar{M}_E) i sprężystości (E_S) oparte zostały na obowiązujących wytycznych [10] oraz informacjach literaturowych z tego zakresu, np. [3], [17]. Wykonano je na odpowiedniej prasie dźwigniowej, wyposażonej w płytkę obciążającą o średnicy 5 cm i cylinder jak przy badaniu CBR. Badania modułów przeprowadzono dla przedziału obciążeń 0,0-0,2 MPa, na próbkach odpadów o uziarnieniu 0-12 mm i wilgotności optymalnej, zagęszczanych jak przy badaniu CBR. Wyniki badań opracowano, wykorzystując następujące zależności:

- moduł odkształcenia pierwotnego

$$M_E = \frac{\Delta p}{\Delta s} \cdot D, \quad (2)$$

gdzie:

Δp - przyrost obciążeń jednostkowych,

Δs - przyrost pierwotnych odkształceń pionowych,

D - średnica płytki obciążającej,

- moduł odkształcenia wtórnego \bar{M}_E wyznaczono według wzoru (2), z uwzględnieniem w nim obciążeń (Δp) i odkształceń pionowych wtórnych (Δs),

- moduł sprężystości

$$E_S = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta p \cdot D(1-\mu^2)}{\Delta s}, \quad (3)$$

gdzie:

Δp - przyrost obciążenia jednostkowego, który wywołał odpowiedni przyrost odkształcenia sprężystego Δs ,

D - średnica płytki obciążającej,

μ - współczynnik Poissona, przyjęto $\mu = 0,35$.

Uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań średnie wartości modułów odkształcenia i sprężystości, określone dla przedziału obciążeń 0,05÷0,15 MPa, przedstawiono w tabelicy 5.

Tablica 5

Moduły odkształcenia i sprężystości

Lp.	Rodzaj odpadów	Średnie moduły odkształcenia [MPa]		Średnie moduły sprężystości
		Pierwotny	Wtórny	
1	Żużel przepalony	20,6	40,3	28,8
2	Żużel nieprzepalony	23,7	38,7	19,9
3	Popioły	22,3	43,1	27,5
4	25% popiołu + 75% żużla przepalonego	20,1	32,8	20,4
5	50% popiołu + 50% żużla przepalonego	24,0	42,9	25,8
6	25% popiołu + 75% żużla nieprzepalonego	24,4	50,6	20,4
7	50% popiołu + 50% żużla nieprzepalonego	21,3	46,6	31,3

Wartości modułów odkształcenia pierwotnego zawierają się w przedziale 20,1–24,5 MPa, a modułów odkształcenia wtórnego w przedziale 32,8–50,6 MPa. W myśl klasyfikacji gruntów do celów drogowych [20] odpowiadają one wartościom modułów odkształcenia mineralnych, drobnoziarnistych gruntów małospoistych, obejmując również grunty niespoiste w zakresie dolnych wartości ich nośności. Ponadto badania wykazały średnio dwukrotną różnicę w wartościach modułów odkształcenia pierwotnego i wtórnego,

Wartości modułów sprężystości zbadanych odpadów i ich mieszanek wahają się w przedziale 19,9–31,4 MPa. Bazując na informacjach literaturowych [10], [17], można je umieścić między drobnoziarnistymi gruntami niespoistymi i spoistymi (gliny mineralne posiadają $E_s \approx 20$ MPa).

4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI

Określone w wyniku badań parametry fizykomechaniczne (tabl. 6) wykazują, że zarówno popioły, jak i żużle przepalane i nieprzepalane oraz ich mieszanki odpowiadają wymogom stawianym materiałom przeznaczonym do budowy dolnych warstw nasypów drogowych. Stosunkowo niskie wartości gęstości objętościowych, wrażliwość na zawilgocenie i słaba zagęszczalność sprawiają, że nadają się one do budowy dolnych warstw nasypów, gdy będą zalegać w miejscach suchych (powyżej zwierciadła wody gruntowej) lub izolowane zostaną od wód gruntowych i zalewowych warstwą wodonieprzepuszczalną.

Tablica 6

Wymagania i uzyskane wyniki badań

Lp	Badana cecha	Wymagania		Wyniki badań odpadów i ich mieszanek					
		dolna warstwa nasypu (poniżej strefy przemarzenia)	górne warstwy nasypów / warstwy ochronne w wykopach	Popioły	Żużel przepalony	Żużel nieprze-palony	25% popiołu + 75% żużla przepalonego	50% popiołu + 50% żużla nieprze-palonego	25% popiołu + 75% żużla nieprze-palonego
1	Maksymalna wielkość ziarn [mm]	1/2 grubości zagęszczonej warstwy ≤ 15 cm	1/3 grubości zagęszczonej warstwy ≤ 15 cm	$d_{max} = 10 \div 25$	$d_{max} = 40 \div 80$	$d_{max} = 10 \div 25$	$d_{max} = 40 \div 80$	$d_{max} = 40 \div 80$	$d_{max} = 10 \div 25$
2	Wskaźnik różnoziarnistości $U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	—	> 7	5,4	35,0	15,0	12,3	35,0	20,0
3	Dopuszczalna ilość ziarn i cząstek < 0,075 mm po 5-ciokrotnym ubiciu w aparacie Proctora [%]	—	≤ 15	47,2	8,2	4,1	13,5	27,7	25,2
4	Wskaźnik piaskowy w stanie naturalnym [%]	—	> 30	24,2	78,3	53,9	60,75	52,7	41,2
5	Wskaźnik piaskowy po 5-ciokrotnym ubiciu w aparacie Proctora [%]	—	≥ 35	12,3	51,7	45,4	39,0	28,6	33,3
6	Mrazoodporność - straty masy po 15 cyklach badania [%]	—	≤ 20	—	30,4	7,5	—	—	—
7	Kapilarność bienna H_{kb} [m]	—	≤ 0,5	> 2,0	0,49	0,69	0,83	1,32	1,08
8	Współczynnik wodo-przepuszczalności k_{10} [cm/s]	—	≥ 10 ⁻²	$4,7 \cdot 10^{-4} + 7,6 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-2} + 1,2 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-2} + 7,5 \cdot 10^{-3}$	$10^{-2} + 1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4} + 9,4 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-2} + 6,0 \cdot 10^{-4}$
9	Pęcznienie liniowe [%]	≤ 2	≤ 2	≤ 1,6	≤ 0,02	0,0	≤ 0,08	≤ 0,22	≤ 0,05
10	Wskaźnik nośności CBR [%]	≥ 5	≥ 10	8,6	23,3	59,1	21,2	15,2	28,6
11	Moduł odkształcenia M_E [MPa]	≥ 15	≥ 15	43,0	40,0	38,0	32,0	42,0	50,0

Badane odpady i ich mieszanki w porównaniu z naturalnymi gruntami, odpowiadającymi im uziarnieniem, charakteryzują się gorszymi parametrami geotechnicznymi, dlatego należy je stosować do nasypów nie wyższych niż 3,0 m.

Żużle przepalone i nieprzepalone oraz ich mieszanki z zawartością do 25% popiołu można zastosować do budowy górnych warstw nasypów pod warunkiem wykonania warstwy mrozochronnej. Popioły oraz mieszanki żużli z zawartością 50% popiołów nie nadają się do budowy górnych warstw drogowych.

Nasypy z przebadanych materiałów winny być w każdym przypadku starannie zagęszczone.

LITERATURA

- [1] Bela M., Cisek T., Kawalec B., Kopka Z., Śliwa J.: Cechy fizyczne i mechaniczne popiołów energetycznych i ocena ich przydatności do robot inżynierskich. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Seria Budownictwo Nr 29/1972. Gliwice.
- [2] Bułat T., Polak J.: Odpady paleniskowe w budownictwie drogowym. Prace ZDUOE. Katowice 1975.
- [3] Cisek T., Kawalec B., Soczawa A., Śliwa J.: Parametry nośności odpadów kopalnianych w zastosowaniu do celów drogowych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. seria Budownictwo Nr 40/1976. Gliwice.
- [4] Drągowski A.: Własności filtracyjne popiołów węglowych elektrowni Łaziska, Jaworzno i Blachownia Śląska. Sympozjum Częstochowa. Wydawn. Geologiczne 1973.
- [5] Drągowski A., Pinińska J.: Analiza procesu zagęszczenia popiołów na tle zmian ich struktury. Zbiór referatów V Krajowej Konferencji Geotechniki. Katowice 1978.
- [6] Grabowski Z., Obrycki M.: Niektóre geotechniczne właściwości odpadów paleniskowych składowanych hydraulicznie w zbiorniku osadowym. Sympozjum Częstochowa. Wydawn. Geologiczne 1973.
- [7] Kawalec B., Śliwa J.: Prototypowa aparatura do badań właściwości odpadów hutniczych, kopalnianych i energetycznych. Problemy Projektowe Biur Projektujących Zakłady Produkcyjne - Zeszyt 2. 1974.
- [8] Norma BN-70/8931-35. Oznaczenie wskaźnika nośności gruntu jako podłoża nawierzchni podatnych.
- [9] Obrycki M.: Geotechniczne właściwości materiałów z hałd hydraulicznego odpowiadania elektrowni. Politechnika Warszawska. Instytut Dróg i Mostów. Praca doktorska. 1974.
- [10] Pachowski J.: Tymczasowo wytyczne techniczne laboratoryjnego oznaczania modułów sprężystości gruntów i materiałów drogowych. Prace COBIRTD, Nr 3/1968.
- [11] Pachowski J.: Popioły lotne i ich zastosowanie w budownictwie drogowym. WKiŁ. Warszawa 1976.
- [12] Pietras Z.: Metody działania i model systemu dla zagospodarowania odpadów paleniskowych. Energetyka, Zeszyt 7-8/1976.
- [13] Pietrzyk K.: Wpływ uziarnienia gruntu na jego wysadzinowość w świetle badań laboratoryjnych. Praca doktorska. Kraków 1964.
- [14] Pietrzyk K.: Analiza wpływu niektórych czynników na pęcznienie przemarzającego podłoża na podstawie badań laboratoryjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, seria Budownictwo Wodne Nr 15/1968.

- [15] Polak J., Suwała R.: Odpary elektrowniane. Przykłady zastosowania w drogownictwie. Przedsiębiorstwo Zagospodarowania Odpadów Elektrownianych, Katowice 1976.
- [16] Rolla S.: Przełomy drogowe i wzmacnianie nawierzchni. WKiŁ, Warszawa 1977.
- [17] Rolla S.: Badania materiałów i nawierzchni drogowych. WKiŁ, Warszawa 1979.
- [18] Skarżyńska K.: Wpływ procesu zamarzania na niektóre właściwości fizykomechaniczne gruntów spoistych. Zeszyty Naukowe WSR, Rozprawy 18. Kraków 1969.
- [19] Soczawa A.: Wysadzinowość odpadów kopalnianych w świetle badań laboratoryjnych. Praca doktorska, Gliwice 1978.
- [20] Wilun Z.: Zarys geotechniki. WKiŁ, Warszawa 1976.
- [21] Woźnica J.: Popioły lotne z hałd przyelektrownianych jako materiał do budowy nasypów budowli komunikacyjnych. Sympozjum Częstochowa, Wydawn. Geologiczne 1973.
- [22] Woźnica J.: Popioły z elektrowni jako materiał do nasypów drogowych. Prace IBDiM, Nr 1, Warszawa 1974.

Recenzent: Doc. dr inż. Leszek Litwinowicz

Wpłynęło w listopadzie 1980 r.

ПРИГОДНОСТЬ ЗОЛЬНО-ШЛАКОВОЙ СМЕСИ ИЗ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ "ЛАЗИСКА"

Резюме

В работе представлены результаты исследований золы и энергетических шлаков, а также их смесей. Проведен анализ возможности употребления их для дорожных работ.

USABILITY OF THE ASH-SLAG MIXTURES FROM THE "ŁAZISKA" POWER STATION FOR HIGHWAY EMBANKMENTS

Summary

The paper presents test results of power plant fly ash and slag and the mixtures of them. An analysis has been done of their possible usage for highway constructions.