

METODY BADAŃ POPIOŁÓW JAKO MATERIAŁU KONSTRUKCYJNEGO

UKD 662.613.004.4:624.131.37:624.131.41/.43

Referat obejmuje wyniki prac badawczych wykonanych przez mgr M. Szymańskiego, mgr M. Doma-gałę, dr J. Pinińską, dr R. Kaczyńskiego, dr A. Dra-gowskiego, dr L. Wysokińskiego i prof. Z. Glazera, pracowników Zespołu Badania Odkształceń Ośrodka Gruntowego Instytutu Hydrogeologii i Geologii In-żynierskiej Uniwersytetu Warszawskiego.

Popioły i części stałe niespalone powstające w różnych zakładach przemysłowych stanowią od daw-na problem zainteresowania, zwłaszcza pod kątem ich wykorzystania dla rozmaitych celów. Powstające odpady są wykorzystywane do produkcji spoiw, ce-gieł, lekkich kruszyw, prefabrykatów elementów bu-dowlanych, jako wypełniacze do materiałów bitu-micznych, do stabilizacji gruntów. Istnieje jednak szereg przemysłów, w których popioły nasuwają wie-le kłopotów, gdyż stanowią produkt odpadowy zu-pelnie niezwiązany z zasadniczą wytwórczością za-kładów. Dotyczy to przede wszystkim energetyki, charakteryzującej się nieustannym rozwojem i roz-budową, co przedstawiono w tabeli I.

Znaczną i stałą się powiększającą w elektrowniach ilość popiołów i żużli, pomimo ich przydatności do różnych celów stanowią obecnie odpady przemysłowe, które muszą być składowane i magazynowane dla umożliwienia ich dalszego wykorzystania. W chwili obecnej nie jesteśmy w stanie zużytkować wszystkich popiołów, powinniśmy je jednak w ten sposób magazynować, aby ich późniejsze wykorzy-stanie było możliwie jak najbardziej ułatwione. Można więc przedstawić problem składowania po-piołów jako powstawanie ziół surowców dla użycia ich w przyszłości. Przy magazynowaniu popiołów musi być jednocześnie zwrócona uwaga na spełnie-nie warunków ochrony środowiska przyrodniczego.

Transport popiołów i żużli na składowisko może być rozwiązywany w różny sposób, jednak obecnie najczęściej stosowany jest transport hydrauliczny. Ten rodzaj transportu posiada szereg zalet, do któ-rych należy zaliczyć znaczne zmniejszenie pylenia i łatwość dostarczenia zawiesiny popiołów i żużla, zwanej pulpą, w dowolne miejsce. Pulpą zostaje transportowana do stawu osadowego, gdzie następuje osadzenie części stałych. Z reguły stawy osadowe wykonywane są w ten sposób, że na wybranym i

zbadanym pod względem warunków inżyniersko-geo-logicznych terenie, wykonuje się groblę podstawową z gruntu rodzimego. W powstałym stawie namywa się pulpę, a z powstających osadów następuje w trakcie dalszej eksploatacji podwyższenie istnieją-cej grobli. Z namytych popiołów i żużli powstaje za-pora nieraz o znacznej wysokości. Wykonanie zapo-ry z gruntu rodzimego od razu do ostatecznej wyso-kości wymaga znacznie większych nakładów inwe-stycyjnych, przy czym nie zawsze możliwe jest uży-cie do budowy gruntu tylko z wnętrza stawu osado-wego, lecz wielokrotnie istnieje konieczność pobiera-nia go z innych miejsc, co prowadzi do zniszczenia niekiedy nawet znacznych obszarów.

Naszkiecowany przebieg procesu budowy stawów osadowych wymaga rozwiązania szeregu problemów, tak aby koszty wykonania mogły być jak najniższe, a jednocześnie, aby zapewnione zostały w pełni wa-runki bezpiecznej eksploatacji. Szereg awarii, jakie miały miejsce na mokrych składowiskach popiołów i żużli, dobitnie wykazały konieczność projektowania stawów osadowych i ich eksploataowania w oparciu o wyniki uzyskane z celowo przeprowadzonych ba-dań.

Odpady przemysłowe transportowane do stawów osadowych zawierają ziarna i cząstki znacznie róż-niące się od siebie, pod względem granulacji, struk-tury i składu mineralnego. Jest to zarówno żużel o średnicy okruchów do kilku centymetrów, poprzez

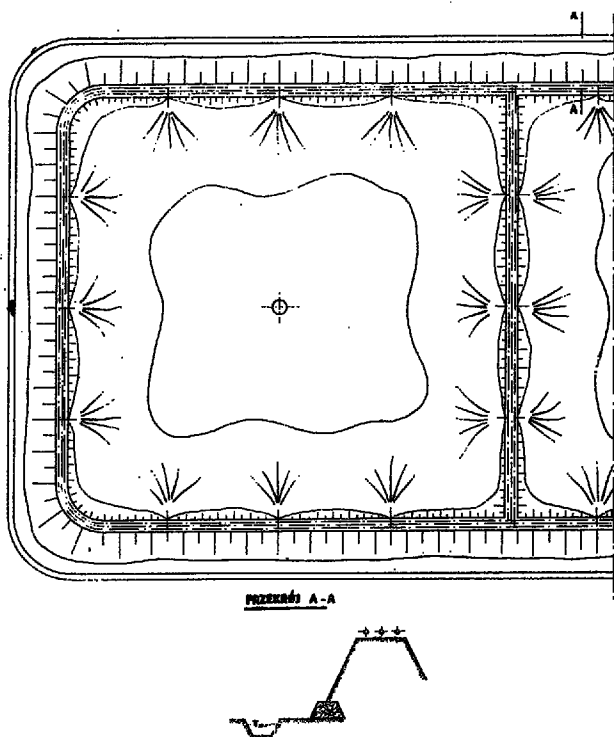
Tabela I

| Rok | Liczba | | Moc zainsta- low. w elek- trowniach za- wodowych spa- lających wę- giel MW | Szacunko- we ilości składowan. popiołów w mln t na rok |
|------|----------------------|--|--|---|
| | elek- trow- ni | w tym elek- trowni za- wodowych spalających węgiel | | |
| 1950 | 429 | 116 | 1408,6 | 1,0 |
| 1960 | 413 | 59 | 4208,6 | 3,0 |
| 1970 | 384 | 46 | 10867,1 | 7,6 |

ANALIZY CHEMICZNE (w % wag.)

| Składniki | Popioły i żużle ze stawu osadowego Elektrowni w Łaziskach | | | próba średnia | Porównawcze dane ze stawów osadowych elektrowni zawodowych spalających węgiel kamienny | Popioły elektrowni | |
|--------------------------------|---|-----------|-----------|---------------|--|--------------------|---------|
| | frakcja | | | | | Konin*) | Turów*) |
| | 0,075—0,06 | 0,25—0,20 | 0,075—1,0 | | | | |
| SiO ₂ | 35,56 | 48,72 | 37,18 | 38,21 | 36—55 | 46 | 51 |
| Al ₂ O ₃ | 19,00 | 23,30 | 17,89 | 19,38 | 15—35 | 8 | 33 |
| Fe ₂ O ₃ | 26,83 | 7,34 | 5,66 | 19,96 | 3—20 | 5 | 6 |
| MgO | 5,22 | 4,52 | 0,88 | 4,90 | 1—5 | 3 | 1 |
| CaO | 7,25 | 4,25 | 3,40 | 6,65 | 2—10 | 30 | 2 |
| Na ₂ O | 0,40 | 0,40 | 0,48 | 0,51 | 0—1 | | |
| K ₂ O | 1,63 | 2,57 | 1,82 | 1,85 | 1—2 | | 4 |
| strata prażenia | 3,10 | 7,82 | 33,01 | 7,25 | 3—30 | 2 | 3 |

* Według prof. Z. Tokarskiego i in. (4).

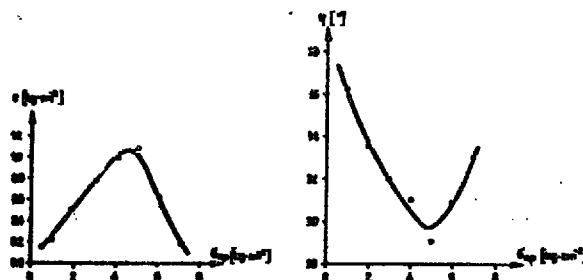


Ryc. 1. Schemat namywania stawu osadowego.

Fig. 1. Pattern of deposition in sedimentary reservoir.

ziarna i cząstki, aż do cząstek koloidalnych. Wynika to z odprowadzania do stawów zarówno odpadów z palenisk, jak i z elektrofiltrów, a nawet roztworów stosowanych do płukania kotłów. Zawartość różnych cząstek w poszczególnych partiach pulpy może wykazywać bardzo duże wahania, podobnie zresztą, jak i własności osadów zdeponowanych w różnych miejscach stawu. Badania i obserwacje istniejących stawów osadowych, analiza przyczyn powstania awarii wykazują, że nie wszystkie partie osadów mogą być wykorzystane jako materiał konstrukcyjny do budowy zapory i istnieje konieczność dokonania segregacji materiału. Najlepszym i najtańszym rozwiązaniem jest dokonanie tej segregacji, a właściwie nawet kształtowanie własności osadu, w trakcie procesu namywania.

Zagadnienie to zostało systematycznie przebadane w Instytucie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej UW poprzez badania modelowe, a uzyskane wyniki



Ryc. 2. Zależności między spójnością, kątem tarcia a obciążeniem normalnym początkowym (σ_{np}) w aparacie bezpośredniego ścinania.

a — spójność, b — kąt tarcia wewnętrzznego.

Fig. 2. Interdependence between cohesiveness, angle of friction, and normal initial loading (σ_{np}) in the apparatus of direct shear.

a — cohesiveness, b — angle of internal friction.

znalazły zastosowanie przy projektowaniu nowych stawów osadowych lub przy przebudowie systemu namywania dla stawów istniejących. Nieliczne dawniejsze publikacje i stosowane w oparciu o nie rozwiązania techniczne przewidywały stałe dostarczanie pulpy i zrzucanie jej do stawu z jednej strony, przy odbiorze wody nadosadowej przez młyny usytuowane po stronie przeciwnej stawu. Powodowało to niewłaściwą sedimentację popiołów w stawie, utrudniając wielokrotnie uzyskanie właściwego materiału do budowy zapory. Poprzez racjonalne namywanie można w zasadniczy sposób polepszyć własności materiału używanego do budowy. Należy dążyć do tego, aby materiał o najkorzystniejszych parametrach wytrzymałościowych osadzał się w strefie zewnętrznej, brzeżnej stawu osadowego, co zapewni najlepsze, możliwe do uzyskania materiały do budowy, spowoduje poprawę własności gruntów stanowiących podłoże przyszłej zapory, ułatwi transport oraz samą budowę zapory.

Rurociągi, którymi dostarczana jest pulpa powinny być usytuowane pierścieniowo wokół stawu. Pulpa nie może być zrzucana do stawu osadowego z wylotów rur umieszczonych na znacznej wysokości, a powinna wypływać z nachylonych do basenu końcówek rur-wąsów, które należy przedłużać rynnami lub lutniami, dochodzącymi do zwierciadła wody w stawie. Przy takim namywanu głównymi powstającymi formami są stożki, które w miarę dostarcza-

Tabela IV

| | Zawartość frakcji w procentach | | |
|---------------|--------------------------------|-----------------|----------|
| | 2—0,1 mm | 0,1—0,006 mm | 0,006 mm |
| Popiół gruby | 80—100 | 0—20 | 0—20 |
| Popiół średni | 60—80 | 20—40 | 0—20 |
| Popiół drobny | 30—60 | 40—70 | 0—20 |
| Popiół lotny | 0—30 | 70—100 | 0—20 |

Tabela III

| | Wymiary w mm |
|---------------------------|-----------------|
| Ziarna żuźlowe | powyżej 2 |
| Ziarna popiołowe | od 0,1 do 2 |
| Cząstki pyłowe | od 0,006 do 0,1 |
| Cząstki drobnodyspersyjne | poniżej 0,006 |

nia materiału ulegają połączeniu. Pobocznicą stożka, na rzędnej położenia zwierciadła wody, ulega załamaniu, kąt nachylenia poboczniczy części nadwodnej stożka wynosi do około 5°, części podwodnej około 20°. Z wielkością tych kątów związana jest bezpośrednio średnica podstawy części nadwodnej stożka, która jest tym większa, im niższe jest położenie zwierciadła wody, co rzutuje znów na rozstaw wąsów.

Analiza składu granulometrycznego gruntów budujących różne partie stożków, powstałych podczas namywania wskazuje na stopniowy, generalny, mimo zmian uziarnienia w kierunku pionowym, wzrost zawartości frakcji aleurytowej i pelitowej w miarę przechodzenia od poziomu zwierciadła wody w stawie do podnóża stożka. Skład granulometryczny osadów budujących stożki zależy od położenia zwierciadła wody. Przy niższym poziomie wody stożek jest zbudowany głównie z frakcji psamitowej, a frakcje drobniejsze zostają osadzone przede wszystkim poniżej stożka, pod wodą. W miarę podwyższenia poziomu wody coraz większy udział w budowie stożka ma frakcja pylasta. Stopień rozfrakcjonowania materiału maleje, co wiąże się głównie ze zmniejszeniem długości drogi szybkiego przepływu wody.

Zasadnicze różnice występują pomiędzy materiałem odłożonym w stożkach, a osadzającym się poza stożkami. Materiał odłożony poza stożkami nie nadaje się do budowy zapory, jego wytrzymałość jako podłoża zapory jest niewystarczająca i wskutek tego może on ulegać wypieraniu. W konsekwencji może to doprowadzić przy zbyt dużej wysokości zapory do powstania osuwiska do wnętrza stawu osadowego.

Dla określenia własności popiołów i żużli konieczne jest przeprowadzenie badań chemicznych, własności fizycznych, a zwłaszcza filtracyjnych i mechanicznych. Ze względu na brak wytycznych wykonania tych badań zaistniała zarówno konieczność adaptowania do tych celów metodyki badań stosowanej dla innych potrzeb, jak i opracowania niekiedy odrębnych metod. O zdolnościach do wiązania można wnioskować na podstawie wyników analiz chemicznych i obliczeń odpowiednich współczynników. Należy podkreślić, że wyniki analiz chemicznych wykazują dość duże zmiany składu chemicznego, związane z rodzajem węgla spalonego w kotłach. Wskazują też, że zawartość poszczególnych składników jest różna w poszczególnych frakcjach. W tabeli II przytoczono wyniki analiz chemicznych dla popiołów elektrowni Łaziska oraz porównawcze dane zebrane z analiz własnych dla popiołów z innych stawów oraz z badań obcych, których wyniki można znaleźć w danych archiwalnych.

Jak wynika z danych, popioły i żuźle ze stawów osadowych zaliczyć należy do popiołów i żużli kwaśnych o zawartości poniżej 30% CaO i współczynnikiem krzemianowym:

$$Ms = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

bliskim lub mniejszym od jedności, co pozwala na określenie ich jako słaboaktywne lub nieaktywne. W wyniku własnych badań należałoby wysunąć wniosek o celowości wykonywania analiz chemicznych dla poszczególnych frakcji, wydzielonych zgodnie z prowa-

dzonym procesem namywania w stawie. Dla oceny popiołów i żużli jako materiału konstrukcyjnego nie ma potrzeby prowadzenia bardziej szczegółowych analiz chemicznych, które są niezbędne przy badaniach osadu pod kątem możliwości wykorzystania do produkcji materiałów budowlanych.

W popiołach i żużlach znajduje się znaczna ilość niespalonego węgla. Procentowa zawartość niespalonego węgla, większa we frakcjach grubszych, nie stanowi czynnika korzystnego przy zastosowaniu popiołów do budowy zapory.

Skład granulometryczny popiołów określa się normowymi metodami, analogicznymi jak dla gruntów, przy czym jak wynika z dużej liczby przeprowadzonych analiz, posiadają one granulację odpowiadającą wg PN/B-02480 grantom drobnodziarnistym, sypkim i mało spoiłowym. Jednocześnie inne własności jak ciężar właściwy, objętościowy i objętościowy szkieletu gruntowego, porowatość, wilgotność naturalna, kapilarna i optymalna, współczynnik odsączalności, podatność na rozmywanie i deformacje filtracyjne, spójność, wskazuje wyraźnie na znaczne różnice pomiędzy popiołami, a gruntami mineralnymi drobnodziarnistymi, co wymaga odmiennego podejścia do ich klasyfikacji.

W oparciu o wyniki wykonanych badań, analizę istniejących norm, wydaje się celowe przyjęcie dla popiołów następujących granic frakcji (tab. III).

Ponieważ przyjęcie klasyfikacji takiej jak dla gruntów jest niewłaściwe i może wprowadzić niepotrzebne pomyłki proponuje się określanie popiołów i żużli głównie w oparciu o procentową zawartość frakcji popiołowej i pyłowej (tab. IV). Przy czym o ile ziarn > 2 mm jest powyżej 50%, używać należy nazwy żuźel. Dla cząstek i ziarn o wielkościach ponad 0,06 mm analizę sitową można przeprowadzić zgodnie z normami, analizę ziarnową dla cząstek o średnicy mniejszej od 0,06 mm metodą pipetową zgodnie z normą PN-66/Z-04008.

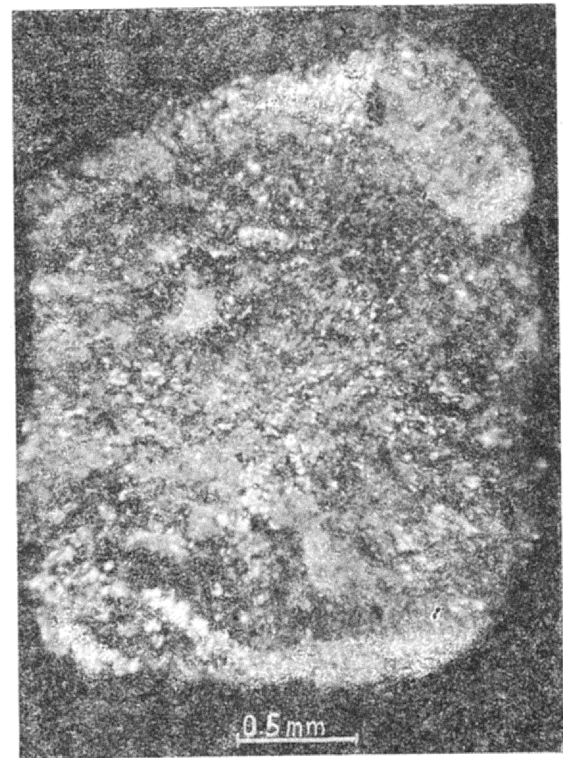
Cząstki żuźla w badaniach makroskopowych, a cząstki i ziarna popiołów przy oglądaniu pod mikroskopem, ujawniają swą odmienność od ziarn i cząstek gruntów mineralnych rodzimych. Badania te wykazują, że stosunkowo nieliczne cząstki lub ziarna posiadają kształty zbliżone do kul, przeważająca natomiast większość ziarn i cząstek ma budowę agregatową. Agregat składa się z kilku cząstek związanych w jeden system za pomocą różnych połączeń, powstałych wskutek działania wysokich temperatur, tworząc spleki, pod wpływem wiązań termicznych, chemicznych i innych. Przeważająca liczba agregatów posiada budowę wewnętrzną bardzo silnie porowatą, pumeksową.

W związku z silnie porowatą budową wewnętrzną ziarn i cząstek napotyka się duże trudności przy określaniu własności fizycznych. I tak, jeśli opierać się na określeniu normowym ciężaru właściwego jako stosunku ciężaru cząstek szkieletu-gruntowego, do objętości wszystkich ziarn i cząstek szkieletu, to musi on zostać zmodyfikowany, gdyż nawet przy rozcieraniu popiołów w moździerzu nie mamy możliwości pozbycia się wszystkich wewnętrznych porów. W tej sytuacji możliwe jest jedynie wyznaczenie ciężaru właściwego określonego jako stosunek ciężaru szkieletu gruntowego do objętości ziarn i cząstek łącznie z objętością zamkniętych porów. Badania



Ryc. 3.

Fig. 3.



Ryc. 4.

Fig. 4.

wykazują duże różnice ciężarów właściwych popiołów, które określone dla popiołów z Łazisk wahały się od $2,12 \text{ G/cm}^3$ do $2,36 \text{ G/cm}^3$, dla popiołów z Ostrołęki od $2,26 \text{ G/cm}^3$ do $2,81 \text{ G/cm}^3$. Badania powinny być wykonywane w piknometrze, przy przestrzeganiu normowego czasu gotowania zawiesiny. Poprzez gotowanie uzyskuje się usunięcie powietrza z porów szkieletu, niemożliwe do osiągnięcia metodami bez gotowania.

W związku z dość dużymi różnicami uzyskiwanych wartości ciężarów właściwych konieczna jest dokładna analiza otrzymywanych wartości wilgotności, ciężaru objętościowego i objętościowego szkieletu gruntowego, gdyż nie jest możliwe ich bezpośrednie porównywanie, tak jak często jest to stosowane dla gruntów mineralnych rodzimych, dla których różnice ciężarów właściwych nie przekraczają zwykle 3%. Różnice ciężarów właściwych popiołów mogą powodować kilkudziesięcioprocentowe różnice wilgotności; przy tych samych ilościach wody, w identycznych próbkach różnych popiołów.

W związku z budową ziarn i cząstek, popioły i żuźle charakteryzują się niskimi ciężarami objętościowymi i ciężarami objętościowymi szkieletu gruntowego, natomiast wykazują dużą wartość wilgotności optymalnej rzędu około 30%.

Szczególne uwagi przy badaniu popiołów jako materiału konstrukcyjnego musi być zwrócona na określenie wielkości spadku krytycznego i wysokości podciągania kapilarnego. Zgodnie z własnymi wynikami badań istnieje znacznie większa wartość podniesienia kapilarnego, niż dla gruntów mineralnych rodzimych. I tak dla popiołów grubych i średnich uzyskiwano wysokość podniesienia kapilarnego przekraczającą 100 cm.

Współczynniki filtracji dla popiołów grubych i średnich mogą być badane w rurach pionowych zarówno ze stałym, jak i ze zmiennym spadkiem. Dla popiołów drobnych i lotnych należy prowadzić badania w rurze poziomej, ze względu na popełniane zbyt duże błędy przy stosowaniu innych metod.

Dla popiołu, który ma stanowić materiał konstrukcyjny do budowy zapory istnieje konieczność

przeprowadzenia badań i określenia wielkości spadku krytycznego. Do tego celu nadaje się opracowana w Instytucie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej metoda badawcza, dla której zbudowane zostały specjalne przyrządy. Analiza uzyskanych wyników badań pozwala na stwierdzenie, że wielkości spadku krytycznego powodującego powstawanie deformacji filtracyjnych w popiołach z węgla kamiennego są zależne od jego zagęszczania i wahały się od 0,7 do 2,0.

Stosunkowo niski ciężar objętościowy, podatność popiołów na deformacje filtracyjne i znaczna wysokość podciągania kapilarnego, co w konsekwencji może doprowadzić do ruchu wody kapilarnej, stanowią czynniki mogące mieć groźne skutki dla pracy zapory. Te własności wymagają od projektanta opracowania celowych warstw filtracyjnych dla obniżenia górnej linii prądu w zaporze i ujmowania wody tak, aby uniemożliwić powstawanie jakichkolwiek wysięków wody ze skarpy odpowietrznej zapory wykonanej z popiołów.

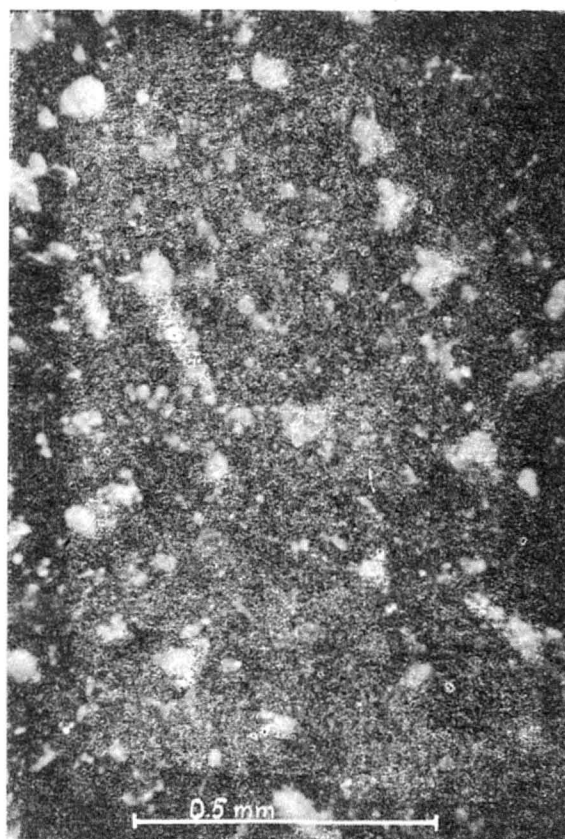
Odnosnie do parametrów wytrzymałościowych popiołów, to dotychczasowe badania były prowadzone w oparciu o kryterium Coulomba-Mohra. Obecnie zaprojektowany i realizowany program badawczy obejmuje również i inne kryteria wytrzymałościowe.

Próbki popiołów badane różnymi metodami w aparacie trójosiowym z uprzednią konsolidacją izotropową i anizotropową, z odpływem i bez odpływu, jak również w aparacie bezpośredniego ścinania, wykazały, że popioły posiadają zarówno wartość spójności, jak i kąta tarcia wewnętrznego. Oczywiście należy tu mówić o spójności zgodnie z kryterium Coulomba-Mohra, a nie o spójności definiowanej jak dla gruntów mineralnych rodzimych. Wielkość tak rozumianej spójności nie wykazuje zależności od zmian wilgotności, posiadając prawie stałą wartość. Jednocześnie popioły, mimo podawania dla nich wartości spójności, nie wykazują żadnej wytrzymałości na rozciąganie. Również wszelkie próby prowadzenia badań makroskopowych, czy laboratoryjnych, tak jak dla gruntów spoistych nie mają celu, gdyż ani wałeczkowanie, ani badania normowe granicy płynności



Ryc. 5.

Fig. 5.



Ryc. 6.

Fig. 6.

nie mogą dać żadnych wyników. Przyczyną uzyskania wartości spójności i to nawet dość znacznej, przy stosowaniu hipotezy Coulomba-Mohra, jest niewątpliwie kształt agregatów ziarnowych i powstające pomiędzy nimi zazębienia. Jednocześnie przy istnieniu pewnej wartości spójności uzyskuje się z badań wytrzymałościowych wartość kąta tarcia wewnętrznego dość znaczną, gdyż od 20° do 40° . Wartość kąta tarcia wewnętrznego jest zależna od stopnia wilgotności próbki, wykazując spadek w miarę zwiększania ilości wody w popiele.

Bardzo interesujące wyniki zostały uzyskane z badań próbek popiołów w aparacie bezpośredniego ścinania, wskazujące na wyraźną zależność parametrów coulombowskich od wielkości obciążania normalnego, przy czym zależność ta nie jest liniowa.

Dla popiołów ze względu na kształt agregatów nie można na pewno mówić o płaszczyźnie, czy też powierzchni ścięcia, a o strefie ścinania. W trakcie ścinania następują zmiany objętościowe oraz niszczenie poszczególnych agregatów, a więc należy szukać rozwiązań w równaniach opierających się na kryteriach energetycznych.

Ograniczony zakres referatu pozwolił jedynie na naszkicowanie wyników uzyskanych w efekcie żmudnych prac badawczych nad własnościami popiołów i żużli. Osiągnięte rezultaty pozwoliły na przedstawienie specyficznych zagadnień dotyczących jednego z rodzajów gruntów antropogenicznych, a jednocześnie przyczyniły się do istotnego postępu w dziedzinie

SUMMARY

The paper presents results of chemical and physico-mechanical studies on black coal ashes. Methodology of these studies is discussed and classification of ashes on the basis of their properties proposed.

rozwiązań praktycznych obejmujących wykorzystanie popiołów i żużli dla wykonywania odpowiedzialnych konstrukcji inżynierskich w już zastosowanych rozwiązaniach projektowych.

LITERATURA

1. Glazer Z., Domagała M., Drągowski A., Kaczyński R., Wysokiński L. — Problematyka badań inżyniersko-geologicznych przy składowaniu odpadów przemysłowych w stawach osadowych. *Prz. geol.*, 1971, nr 5.
2. Glazer Z., Domagała M., Drągowski A., Kaczyński R., Krajewska-Pinińska J., Wysokiński L. — Inżyniersko-geologiczne warunki wykonania zapory z gruntów antropogenicznych elektrowni „Łaziska II”. *Maszynopis, Arch. Zakł. Prac Geol. UW*, 1972.
3. Glazer Z., Drągowski A. — Kształtowanie własności gruntów antropogenicznych w procesie namywania. *Maszynopis, IHiGI UW*, 1972.
4. Tokarski Z., Kałwa M., Ropska H. — Perspektywy wykorzystania odpadów paleniskowych w przemyśle chemicznym. Zbiór referatów i komunikatów na ogólnokrajową konferencję w Turossowie, S.E.P., Turossów 2 IV 1971.
5. Szymański M. — Inżyniersko-geologiczna charakterystyka warunków składowania i własności gruntów antropogenicznych Elektrowni „Ostrołęka”. *Praca magist., IHiGI UW*, 1972.

РЕЗЮМЕ

В работе представлены результаты химических и физико-механических исследований зол каменных углей. Описана методика проведения работ и предложен проект классификации зол, основывающейся на их свойствах.