

Jerzy JEZNACH, Józef LEWIŃSKI, Edward PIERZGALSKI

## Zabezpieczenie przed erozją wietrzną odpadów składowanych w zbiorniku Żelazny Most

### Abstract

**Wind erosion control on the reservoir Żelazny Most.** Poland has a world leading position as a copper producer. The copper mines are located in "Lubin and Głogów Copper Mining Region" where also copper industry take place. Solid waste from a copper industry that can be reused is landfilled. The biggest landfill called Reservoir "Żelazny Most" has the area of 12.4 km<sup>2</sup>. Accumulated solid waste material amounted 1995 to about 250 mln m<sup>3</sup>. Such huge landfill cause many environmental problems. Serious problem is the air pollution. Surface of solid waste quickly dries forming beaches from 100 m to 200 m wide around dams of reservoir. The silt particles are transported with the wind and are deposited far away from the landfill. Most of well-know methods of dust control can not be used in that case due to the technology of waste landfilling. Investigation on dust control methods having regard to the specificity of the reservoir Żelazny Most are described in the paper.

*Key words: dust control, wind erosion, structure-forming agents.*

### Wstęp

Składowane w zbiorniku Żelazny Most odpady poflotacyjne w postaci pulpy ulegają sedymentacji i odwodnieniu. Powierzchnia odwodnionej pulpy bardzo szybko przesyca.

Przyjęta technologia eksploatacji i rozbudowy obiektu, uwarunkowana głównie względami bezpieczeństwa, wymaga takiego składowania odpadów, aby wewnątrz zbiornika wzdłuż zapór tworzyły się plaże szerokości do 200 m. Przeschnięte odpady ulegają procesowi erozji wietrznej. Większe cząsteczki wywiewanych odpadów osiadają na odpo-wietrznych skarpach zbiornika, utrudniając ich zadarnienie. Mniejsze, przy silniejszych wiatrach, są przenoszone na duże odległości, dochodząc min. do miasteczka Rudna. Duża zawartość metali (Cu, Mn, Fe, Mg) i innych pierwiastków powoduje zanieczyszczenie powietrza oraz gleb w sąsiedztwie zbiornika. Prace badawcze prowadzone przez Centrum Badawcze i Projektowe Miedzi "Cuprum" i Katedrę Melioracji Rolnych i Leśnych SGGW we współpracy z Zakładem Hydrotechnicznym ZG Rudna doprowadziły do opracowania i wdrożenia metod zwiększających odporność odpadów na wywiewanie, w efekcie których znacząco ograniczono procesy erozji wietrznej.

## Mechanizm procesu erozji wietrznej

Unoszenie i transport cząsteczek wskutek erozji wietrznej odbywa się dzięki energii wiatru, która zostaje częściowo rozproszona przy powierzchni w postaci ciepła wskutek gradientu temperatury powietrza i temperatury powierzchni gruntu. Pozostała część energii wiatru docierająca do powierzchni zostaje zużyta na procesy erozyjne. Teoria transportu cząstek gleby, gruntu lub innego materiału z ich powierzchni wskutek ruchu powietrza wyróżnia trzy formy tego procesu (rys. 1):

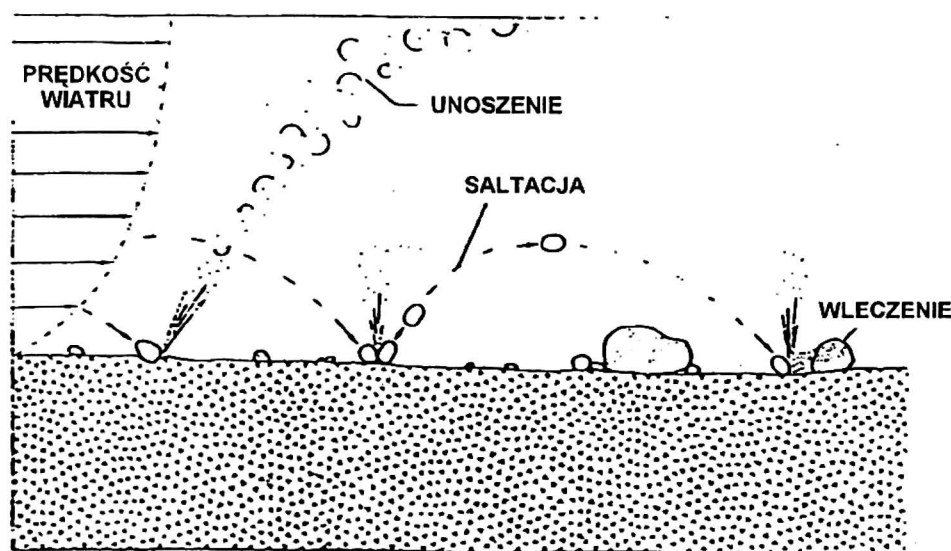
- wleczenie cząstek po powierzchni,
- saltacje, czyli unoszenie cząstek na niewielką (kilkudziesięciu cm) wysokość i ich opadanie w innym miejscu,
- unoszenie i przenoszenie na znaczne odległości zwykle najdrobniejszych (pylastych) cząstek erodowanego materiału.

Do najważniejszych czynników, od których zależy ilość wywiewanego materiału, zalicza się: warunki klimatyczne, przede wszystkim prędkość i czas trwa-

nia wiatru, warunki na powierzchni terenu (szorstkość powierzchni, jej pokrycie, długość powierzchni bez przeszkód itp.), podatność erodowanego materiału na odspajanie i przenoszenie jego cząstek.

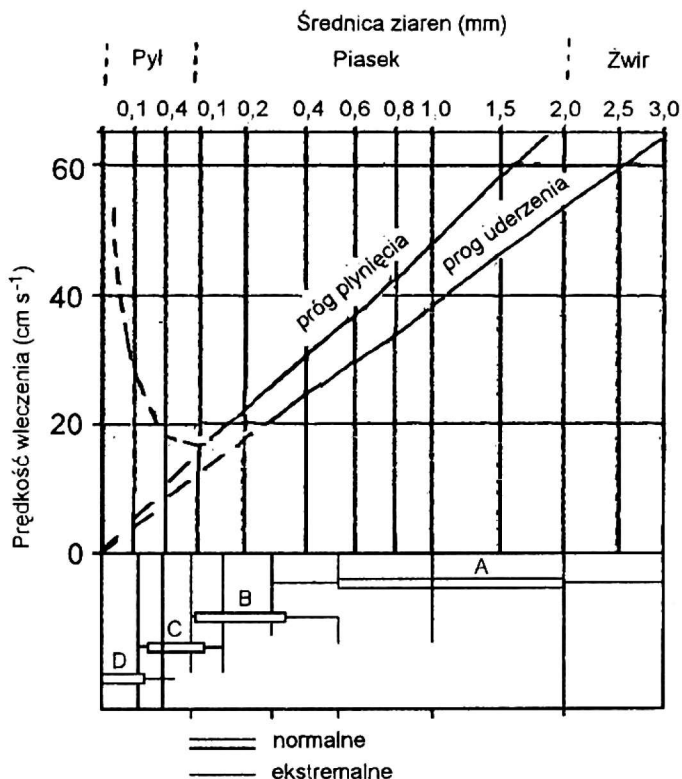
O rozpoczęciu i natężeniu procesu erozji decyduje bilans sił, pod wpływem których znajdują się cząstki erodowanego materiału. Do sił hamujących odspajanie i unoszenie cząstek należy siła grawitacji, tarcia i spójności. Wskutek ruchu powietrza wokół cząstki powstaje różnica ciśnień umożliwiającą jej pionowe odnośnienie. Większe cząstki wskutek siły grawitacji opadają na powierzchnię, uderzając o inne, inicjując proces ich wleczenia. Saltacji ulegają większe cząstki gruntu, które są unoszone i opadają w bliskiej odległości.

Wszystkie formy ruchu występujące w procesach eolicznych (unoszenie, saltacja i wleczenie) zaczynają się przy określonych prędkościach wiatru. Niezbędna prędkość dla powstania ruchu unoszenia cząstek nazywana jest według Bagnolda (cyt. za Embleton, Thornes 1979) progim płynięcia, a prędkość wymagana dla podtrzymania tego zjawiska w wyniku uderzenia ziaren gruntu nazy-



RYSUNEK 1. Podstawowe formy erozji wietrznej

wa się prędkością progową uderzenia. Ich wartości liczbowe dla poszczególnych form ruchu w zależności od średnicy cząstek gruntu podano na rys. 2.



RYSUNEK 2. Prędkości progowe transportu cząstek w zależności od ich średnicy: A – wleczenie, B – saltacja, C – unoszenie lokalne, D – unoszenie na dalsze odległości

Na obiekcie Żelazny Most najbardziej uciążliwą dla środowiska formą erozji wietrznej jest zapylenie, powstające wskutek unoszenia i przenoszenia najdrobniejszych frakcji piaszczystych oraz części pylastych odpadów flotacyjnych.

## Metody zapobiegające erozji wietrznej

Można wyróżnić trzy grupy metod zapobiegających erozji wietrznej:

- Metody polegające na zmniejszeniu prędkości wiatru w przypowierzchniowej warstwie gruntu. Zaliczyć tu można stosowanie pasów wiatrochronnych, płotków itp.
- Metody polegające na pokrywaniu erodowanej powierzchni warstwą ochronną. Tworzyć ją mogą pokrycia roślinne (zalesiania, zakrzaczenia, zadarniowania, mulczowanie), ale także pokrycia techniczne, jak np. błony bitumiczne lub inne substancje chemiczne.
- Metody zwiększające odporność cząstek gleby (gruntu) na odspajanie i wywiewanie. Zmniejszenie podatności na erozję uzyskuje się przez: utrzymanie wysokiego uwilgotnienia w przypowierzchniowej warstwie gruntu, stosowanie preparatów strukturotwórczych, powodujących zlepianie cząstek w większe agregaty.

Wybór metody zależy od warunków występujących na danym obiekcie.

W warunkach zbiornika Żelazny Most z pierwszej grupy metod, przy obecnej technologii składowania odpadów, możliwe byłoby zastosowanie jedynie barier płotkowych na plażach. Wymagałoby to jednak dużego nakładu pracy dla ich częstego przestawiania.

Niemożliwe natomiast jest stosowanie roślinności wysokiej na koronach zapór ze względu na szkodliwe z geotechnicznego punktu widzenia oddziaływanie korzeni drzew.

Stosowanie zabiegów fitomeliacyjnych w celu wytworzenia pokryć roślinnych byłoby na zbiorniku Żelazny Most możliwe, lecz wymagałoby zmiany technologii składowania odpadów. Konieczne byłoby wypełnianie pulpą danego se-

ktora, większą niż obecnie warstwą i wyłączenie go z eksploatacji na dłuższy okres (kilka miesięcy) niezbędny do np. zadarnienia. Jednak wprowadzenie zmian technologicznych mogłoby niekorzystnie wpłynąć na stateczność zapór (nierównomierne obciążenia, wytworzenie powierzchni poślizgowych).

Możliwe jest stosowanie sztucznych pokryć ochronnych np. w postaci natrysku bitumicznego. Ich podstawową wadą, poza wysokimi kosztami, a także krótkim okresem oddziaływania spowodowanym częstym napełnianiem pulpą sektorów, jest niebezpieczeństwo skażenia środowiska substancjami ropopochodnymi.

Najbardziej przydatne do zastosowania na plażach zbiornika Żelazny Most wydają się być sposoby wymienione w trzeciej grupie metod, polegające na zwiększaniu siły spójności gruntu poprzez utrzymanie odpowiedniego uwilgotnienia. Celowe wydaje się także zwiększenie odporności cząstek na wywiewanie wskutek poprawy ich struktury.

## **Zabezpieczenie składowiska Żelazny Most przed erozją wietrzną w różnych warunkach pogodowych**

### **Okres letni**

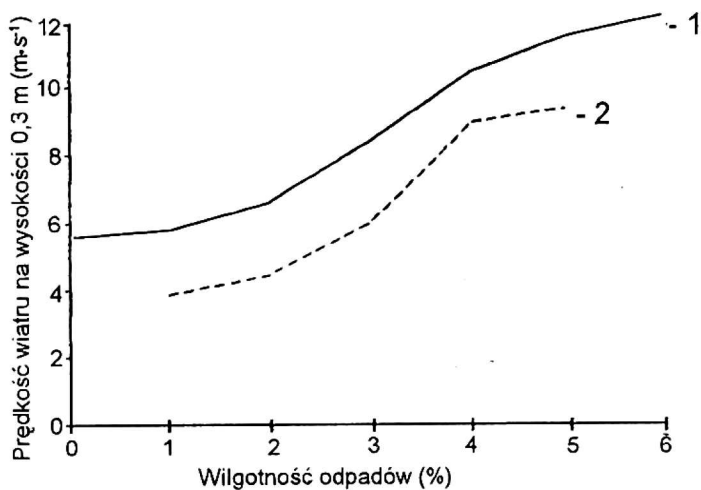
Pierwsze prace nad zabezpieczeniem przed pyleniem prowadziło w latach 1987–1989 CBiPM "Cuprum" we współpracy z Wydziałem Hydrotechnicznym ZG "Rudna", Zakładem Usług Agrolotniczych w Mirosławicach oraz Wytwórnią Emulsji Asfaltowej w Tarnowie. W wyniku wielu badań i doświadczeń opracowa-

no metodę "EMAS", polegającą na stabilizacji plaż zbiornika rozcieńczoną emulsją asfaltową, która – tworząc cienką bitumiczno-mineralną warstwę na powierzchni odpadów – skutecznie i w stosunkowo długim okresie chroni ją przed wywiewaniem. Rozpryskiwany za pomocą śmigłowca wodny roztwór emulsji asfaltowej składa się z kationowej sredniorzpadowej emulsji asfaltowej, stabilizatora w postaci soli czwartorzędowej aminy alifatycznej oraz wody z sieci wodociągowej (Grotowski i in. 1992). Według dotychczasowych doświadczeń osiąga się trzymiesięczną trwałość warstwy ochronnej.

Drugim kierunkiem prac nad ograniczeniem pylenia ze składowiska były badania podjęte przez Katedrę Melioracji Rolnych i Leśnych SGGW w Warszawie w 1991 r. Ich celem było opracowanie metody zwiększającej odporność powierzchni odpadów na wywiewanie poprzez zwiększenie siły spójności pomiędzy cząsteczkami. Na podstawie wykonanych pomiarów określono zależność między wilgotnością wierzchniej warstwy odpadów a prędkością wiatru inicjującą procesy erozyjne. Zależność tę przedstawiono na rys. 3.

W wyniku tych prac zaproponowano rozwiązanie polegające na zwilżaniu odpadów przez deszczowanie.

Badania nad określeniem technologii zraszania wykazały, że odpady poflotacyjne charakteryzują się małymi właściwościami retencyjnymi wody i dużą infiltracją wierzchnich warstw. Właściwości te ograniczają wielkość dawek polewowych możliwych do zastosowania przy deszczowaniu. Z doświadczeń wyni-



RYSUNEK 3. Intensywność erozji wietrznej w zależności od wilgotności powierzchni odpadów: 1 – wleczenie ciągłe, 2 – wleczenie inicjujące

ka, że w normalnych warunkach pogodowych wielkości dawki nawadniającej niezbędnej do zwilżenia 5 cm warstwy odpadów wynoszą 3 mm. Stosowanie większych dawek jest niecelowe z powodu infiltracji wody w głąb profilu odpadów. Przy silnych wiatrach i dużym nasłonecznieniu tak małe dawki wody ulegają szybkiemu wyparowaniu. Dla utrzymania dużej wilgotności odpadów konieczne jest więc częste deszczowanie.

Dlatego też podjęto próby (Pierzgałski, Jeznach 1992, 1993) zastosowania substancji, które dodawane do rozdeszczowywanej wody poprawiłyby trwałość zwilżania. W tym celu przetestowano trzy substancje: wywar posiarczynowy, wywar melasowy i syrop skrobiowy, które są organicznymi produktami ubocznymi przemysłu celulozowego (wywar posiarczynowy), spirytusowego (wywar melasowy) i ziemniaczanego (syrop skrobiowy).

Badania laboratoryjne oraz terenowe wykazały, że wodne roztwory tych substancji zlepiają drobne cząstki odpadów

poprzez wytworzenie powierzchniowej skorupy odpornej na działanie wiatru. Z doświadczeń wynika, że najbardziej odpowiednie stężenie roztworów wynosi 1:10. Przy dawce 3 mm miąższość wytworzonej skorupy sięgała od 5 do 10 mm. Trwałość skorupy zależy od warunków meteorologicznych. Większe opady powodują wymywanie roztworów i utratę zdolności ochronnych powierzchni odpadów. Z punktu widzenia kosztów stosowania substancji strukturotwórczych jest to ich niewątpliwa wada. Biorąc jednak pod uwagę gospodarkę wodną na zbiorniku, przepuszczalność powierzchni może być oceniana jako cecha pozytywna. Nieprzepuszczalna powłoka powoduje bowiem przy silnych opadach duże spływy powierzchniowe i szybkie podnoszenie się zwierciadła wody w zbiorniku oraz konieczność odprowadzania ponadnormatywnych ilości wody do Odry. Przy powłoce przepuszczalnej znaczna część opadu jest retencjonowana w profilu pionowym odpadów i wolniej, w postaci odpływu gruntowego, przepływa do centralnej części zbiornika. Do nie w pełni rozpoznanych problemów mogących wystąpić przy wdrażaniu proponowanej technologii może być charakterystyczny zapach wydzielany podczas deszczowania oraz koszt i możliwości zakupu stosunkowo znacznych ilości substancji strukturotwórczych.

#### Okres zimowy

Składowanie odpadów poflotacyjnych w zbiorniku Żelazny Most odbywa się w okresie całego roku. W zimie zdarzają się także przypadki intensywnego pylenia ze składowiska. Większa częstot-

liwość tego pylenia występuje w okresie tzw. lekkiej zimy, tj. zimy bezśnieżnej lub z bardzo małą pokrywą śniegu przy średniej dobowej temperaturze powietrza do  $-5^{\circ}\text{C}$ . Szczególnie duże natężenie erozji wietrznej obserwuje się, gdy temperatura w ciągu dnia podnosi się do kilku stopni powyżej zera. Wierzchnia kilkumilimetrowa warstwa odpadów przesyca bardzo szybko i zostaje unoszona przez wiatr.

Zabezpieczenie przed pyleniem powierzchni odpadów w zbiorniku Żelazny Most w okresie lekkiej zimy jest zagadnieniem trudnym do rozwiązania. Stosowane z dobrym rezultatem w okresie letnim metody nie sprawdzają się w czasie zimy. Nie można bowiem używać deszczowni przy niskich (poniżej zera) temperaturach powietrza, gdyż istnieje niebezpieczeństwo uszkodzenia urządzeń na skutek zamarzania wody. Natomiast natrysk emulsją asfaltową jest nieskuteczny, ponieważ powstająca powłoka pęka i łuszczy się odsłaniając odpady.

Dla rozwiązania tego problemu przeprowadzono badania nad zachowaniem się powierzchni odpadów zwilżanych wyżej opisanymi roztworami, wywaru posiarczynowego i melasowego oraz syropu skrobiowego, w warunkach niskich temperatur. Doświadczenia prowadzono w laboratorium przy temperaturach od  $+1$  do  $-30^{\circ}\text{C}$ . Przy zastosowaniu podciśnienia około 20 KPa nie stwierdzono zniszczeń powłok ochronnych. Wskazuje to na możliwość stosowania tych substancji w okresie zimowym.

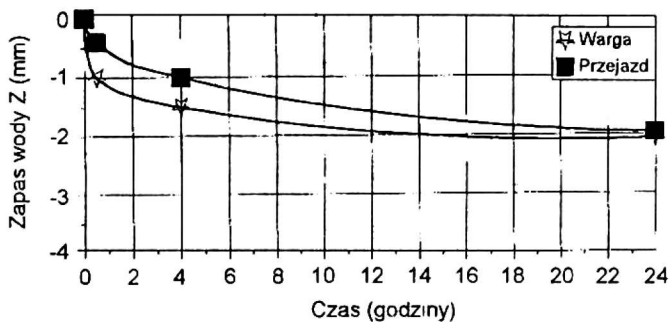
### **Zabezpieczenie przed pyleniem w warunkach nadbudowy**

Roczny przyrost rzędnej odpadów poflotacyjnych w zbiorniku Żelazny Most wynosi około 1,3 m. Co dwa lata zapory zbiornika są na poszczególnych sekcjach podwyższane o 2,5 m. Materiał używany do nadbudowy pochodzi głównie z odpadów poflotacyjnych zgromadzonych na plażach. W trakcie nadbudowy odpady zbierane są cienkimi warstwami z plaży i spychane na zapórę. Przy tej technologii nadbudowy odpady mają mocno naruszoną strukturę, co powoduje ich większą podatność na pylenie.

W trakcie wykonywania nadbudowy powstają charakterystyczne wyniesienia odpadów pomiędzy przejazdami spycharek, nazywane wargami. Wyniesienia te mają strukturę luźną i nie związaną. Szerokość ich waha się od około 1,2 do 2,5 m, a wysokość dochodzi do 1 m. Pasy przejazdów mają strukturę bardziej zwartą. Ich szerokość wynosi około 3,70–3,85 m.

Obecnie w warunkach nadbudowy nie stosuje się żadnych metod lub sposobów zabezpieczających przed pyleniem. Przy niesprzyjających warunkach meteorologicznych obserwuje się znaczne natężenie pylenia zarówno z plaż, jak i zapór zbiornika.

Analiza wyników badań dynamiki wysychania odpadów w warunkach nadbudowy (rys. 4.) wykazała stosunkowo szybkie zmiany uwilgotnienia po deszczowaniu. Dawka polewowa wystarcza zaledwie na 24 godziny dla wargi powstającej pomiędzy przejazdami i około 48 godzin na przejazdach. Po tym



RYSUNEK 4. Zmiany zapasów wody pod wpływem deszczowania w warunkach nadbudowy

czasie odpady mogą być podatne na pylenie.

Stosowana na zbiorniku Żelazny Most technologia wykonywania nadbudowy jest dopracowana technicznie i organizacyjnie. Jednak ze względu na występowanie pylenia w trakcie prac technologia ta powinna zostać zmodyfikowana przez wyeliminowanie warg powstających po przejazdach spycharek. Odpady pozostające na wargach powinny być zbierane przez spycharki przy następnym przejeździe. Zmniejszy się w ten sposób deniwelacje plaż w trakcie nadbudowy, a odpady będą miały bardziej zwartą strukturę. Natomiast odpady składowane na koronie zapory powinny być zagęszczone spycharkami po każdym przejeździe.

Szczegółowa analiza warunków technicznych i technologicznych występujących w trakcie nadbudowy wykazała, że natrysk emulsją asfaltową i deszczowanie roztworami substancji strukturotwórczych nie mogą być stosowane ze względu na ciągłą pracę ludzi i sprzętu na nadbudowanej części zbiornika oraz systematyczne naruszanie powierzchni odpadów. Zmniejszenie natężenia erozji wietrznej w trakcie nadbudowy może być osiągnięte jedynie przez deszczowanie.

Uwzględniając warunki środowiskowe występujące w trakcie nadbudowy zbiornika, proponuje się zastosowanie deszczowni pasowej typu RAINBOY. Deszczownia ta jest mała, elastyczna i funkcjonalna. Może być ustawiona na koronie zapory i przestawiana na różne stanowiska. Przy tej deszczowni wyłączony z prac ziemnych zostanie jeden przejazd spychacza jedynie w trakcie deszczowania. Na sąsiednich przejazdach mogą w czasie zraszania pracować maszyny, gdyż deszczowanie nie powoduje żadnych ujemnych skutków dla sprzętu.

## Podsumowanie

Problem ograniczenia erozji wietrznej ze składowiska odpadów poflotacyjnych Żelazny Most jest wyjątkowo trudny do rozwiązania ze względu na wysokość i wielkość zbiornika oraz technologii składowania odpadów. Większość znanych w świecie metod nie może być w tych warunkach zastosowana.

Z tego powodu podjęto prace badawcze nad opracowaniem metod spełniających wymogi specyfikacji zbiornika. Centrum Badawcze i Projektowe Miedzi "Cuprum" opracowało metodę EMAS, polegającą na pokryciu plaż zbiornika emulsją bitumiczną. Badania Katedry Melioracji Rolnych i Leśnych SGGW wykazały, że skuteczną metodą może być deszczowanie, zwiększające siłę spójności między cząsteczkami i tym samym ich odporność na wywiewanie.

Małe zdolności retencyjne odpadów, duża infiltracja oraz duże prędkości wiatrów (trzykrotnie większe na koronie za-

pory w stosunku do terenów otaczających zbiornik) powodują konieczność podawania małych, lecz częstych dawek polewowych. Wydłużenie trwałości zraszania można osiągnąć poprzez dodawanie do rozdeszczowywanej wody substancji strukturotwórczych. Pozytywne rezultaty uzyskano przy testowaniu roztworów wywaru posiarzynowego, wywaru melasowego i syropu skrobiowego. W przeciwieństwie do powłoki bitumicznej roztwory te ograniczają pylenie także w okresie zimy.

Wdrożenie metody EMAS oraz stosowanie deszczowania znacząco ograniczyło pylenie ze składowiska Żelazny Most. Problemem do rozwiązania może być ocena wpływu metody EMAS na zanieczyszczenie środowiska substancjami ropopochodnymi oraz wyeliminowanie zapachów wydzielanych przez substancje strukturotwórcze.

## Literatura

- EMBLETON C.E., THORNES J.B. 1979: *Processes in Geomorphology*. Edward Arnold, London.
- GROTOWSKI A. i in.; 1992: *Dokumentowanie i ocena skuteczności stabilizacji powierzchni odpadów, realizowanych przy użyciu śmiłowca oraz sprawdzenie możliwości zastosowania nowych substancji stabilizacyjnych*. Cent. Badawczo Projektowe Miedzi "Cuprum", Wrocław.
- KELLER E. 1982: *Environmental Geology*. Merrill Pub. Com. Ohio.
- PIERZGALSKI E., JEZNACH J. 1991: *Konceptcja zabezpieczenia składowiska odpadów kopalni Z.G. Rudna przed pyleniem*. KMRiL SGGW, Warszawa.
- PIERZGALSKI E., JEZNACH J. 1992: *Określenie warunków pracy maszyny deszczującej typu Rainstar przy stabilizacji powierzchni odpadów w składowisku "Żelazny Most"*. Maszynopis KMRiL SGGW, Warszawa.
- PIERZGALSKI E., JEZNACH J. 1993: *Określenie warunków pracy maszyny deszczującej typu Rainstar przy stabilizacji powierzchni odpadów w składowisku "Żelazny Most"*. KMRiL SGGW, Warszawa (maszynopis).
- PIERZGALSKI E., JEZNACH J. 1994: *Określenie sposobu stabilizacji powierzchni odpadów składowiska "Żelazny Most" w warunkach nadbudowy i "lekkiej zimy"*. KMRiL SGGW, Warszawa (maszynopis).
- PODSIADŁOWSKI S. 1994: *Wpływ energii jednostkowej uprawy na strukturę agregatową i erozję pulweryzacyjną gleby lekkiej*. Rocz. AR w Poznaniu, Mel. i Inż. Środ. Nr 14; str. 211–218.
- SIENKIEWICZ R. 1993: *Stan zanieczyszczeń powietrza w dorzeczu Odry w zależności od cyrkulacji atmosfery*. Zesz. Nauk. AR Inż. Środ. 232, Wrocław.
- TWAROWSKI R., GENDOLLA T. 1993: *Chemizm opadów atmosferycznych środkowego dorzecza Odry*. Zesz. Nauk. AR Inż. Środ. 232, Wrocław.
- WHITE I.D., MOTTERSHEAD D.N., HARRISON S.J. 1992: *Environmental Systems*. Chapman and Hall, London.
- WOLSKI W. 1987: *Opinia o rozbudowie zbiornika Żelazny Most do pojemności 350 mln m oraz dalszej rozbudowie zbiornika*. SITWM, Warszawa (maszynopis).
- ZOBEL J. 1992: *Zbiornicze opracowanie wyników pomiarów zanieczyszczeń pyłowych powietrza atmosferycznego w rejonie składowiska odpadów poflotacyjnych "Żelazny Most"*. "Proat" Sp.z o.o. Szczecin.

### Adresy autorów

J. Jeznach, E. Pierzgalski

Katedra Melioracji Rolnych i Leśnych SGGW  
02-787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 166

J. Lewiński

KGHM Polska "Miedź" SA

59-301 Lublin,

ul. Skłodowskiej-Curie 48