

Krzysztof WIERZBICKI

Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa, Warszawa
Institute for Building, Mechanisation and Electrification of Agriculture, Warsaw

Wybrane metody pomiarów erozji wodnej nachylonych powierzchni utworów antropogenicznych **Chosen water erosion measurement methods of the sloped surface layers of anthropogenic formations**

Słowa kluczowe: erozja wodna, metody pomiaru, hydroobsiew

Key words: water erosion, measurement methods, hydroseeding

Wprowadzenie

Niszczenie, degradacja gleb i gruntów, jak też wiele zmian w ukształtowaniu powierzchni ziemi następuje pod wpływem gospodarczej, a zwłaszcza przemysłowej działalności człowieka (czynnika antropogenicznego) lub niekorzystnych warunków przyrodniczych, jak na przykład procesów erozyjnych.

Pojęcie „erozja” obejmuje procesy odspojenia i odrywania cząstek gruntu oraz przenoszenie ich, a następnie osadzanie w innych miejscach. Procesy te są rezultatem niszczącego oddziaływania czynników atmosferycznych, w tym wody (erozja wodna) i wiatru (erozja eoliczna) opisanych w wielu pracach (m.in. Józefaciuk i inni 1976, Henesal

i Duchatel 1990, Józefaciuk i Józefaciuk 1992).

W wyniku niekorzystnego oddziaływania na powierzchnię ziemi tych dwóch głównych czynników (antropogenicznego i atmosferycznego), powstają przekształcone geomechanicznie grunty o różnych właściwościach. Na ogół są to grunty nasypowe, bezglebowe, zdeformowane, będące utworami antropogenicznymi.

Na podstawie przeglądu stosowanych metod pomiarów erozji wodnej nachylonych powierzchni utworów antropogenicznych opracowano w IBMER modyfikację tych metod oraz zaproponowano trzy nowe, pozwalające lepiej ocenić etapy procesu erozji, tj. odpajanie, odrywanie, przenoszenie cząstek gruntu. Omawiane metody opracowano na potrzeby badań laboratoryjnych, mogą być też wykorzystane w badaniach eksploatacyjnych.

Metoda stymulowania opadu powodującego kontrolowaną erozję wodną

Symulatory opadu stosowane przez: Voriesa i von Bernutha (1990), Jareta i innych (1994), Józefaciuka i innych (1976), umożliwiały badania powierzchniowej erozji gleb o spadkach maksimum 10%. Jedynie urządzenie Henesala i Duchatela (1990), nazwane erodymetrem strumieniowym, stosowano przy pochyleniach 0; 27; 45; 60°. Na próbkę gruntu nie oddziałują tu pojedyncze krople, a strumień cieczy.

Wobec powyższego trudno tu oceniać fazę procesu erozji odspajania i przenoszenia cząstek gruntu. Można jedynie oceniać fazę odrywania.

Stwierdzić należy, że dotychczas zarówno konstrukcje symulatorów, jak i ich charakterystyki robocze nie zostały znormalizowane. Trudno więc niekiedy porównywać wyniki badań uzyskiwane podczas stosowania różnych symulatorów.

Pod pojęciem „charakterystyki robocze” należy rozumieć następujące parametry symulatora:

- natężenie opadu, I [$\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$] (powinna być możliwość regulowania),
- średnia średnica objętościowa kropli, D_{50} [mm],
- sumaryczna energia kinetyczna, $E_{kc} = 29,8 - 127,5/I$ [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$],
- zakresy umieszczenia symulatora ponad badaną próbką [cm],
- zakresy pomiaru wagowego objętości zerodowanego materiału z próbki,
- zakres regulacji ciśnienia wody na dopływie do symulatora [MPa],
- zakres trwania symulowanego opadu [min],

- zakres możliwych do ustawiania pochyłeń próbek gruntu [°].

Zbudowany w Instytucie (IBMER) symulator opadu ma następującą charakterystykę:

1. Natężenie opadu z symulatora w postaci kropli wylatujących z sześciu cienkich kapilar umieszczonych na przewodzie długości 15 cm, wykonującym cyklicznie obroty o 15°, w zależności od wydajności uzależnionej od ciśnienia wynosiło: 114,2; 87,5; 67 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, a ciśnienie na dopływie do symulatora wynosiło odpowiednio: 0,15; 0,1; 0,06 MPa, ustalono je stabilizującym układem zaworów.
2. Powierzchnia próbki 0,24 m^2 (60 × 40 cm) przy miąższości 15 cm z możliwością umieszczenia jej pod symulatorem w odległości od 1 do 2,5 m (za najkorzystniejszą odległość uznano 1,3 m).
3. Maksymalny czas symulowanego opadu ustalać należy w zależności od rodzaju gruntu, tak aby masa zerodowanego materiału spływająca z powierzchni próbki zapewniała dokładność metod wagowych powyżej $\pm 2\%$.
4. Do pomiaru średnicy objętościowej kropli (D_{50}) zastosowano analizator widma kropeł typu AWK produkcji Instytutu Lotnictwa w Warszawie.

Znając średnicę D_{50} z wzoru Kincaida (1997), można obliczyć energię kinetyczną kropli:

$$E_k = 2,79 + 7,2d_{50} [\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$$

$$(1 \text{ kg} = 1 \text{ mm opadu m}^{-2})$$

Pomiar energii kinetycznej jest istotny ze względu na wyniki badań Maldenhauera i Kempera (1969) i Morgana (1986), w których stwierdzono, że

stopień infiltracji na różnych glebach zmniejsza się szacunkowo o jeden rząd wielkości, kiedy skumulowana energia kropli na jednostkę powierzchni wynosi $500 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$.

Można również ze wzoru Lebediewa (1977) wyznaczyć ciśnienie (P) wywierane bezpośrednio przez opadającą z prędkością V_{\max} kroplę wody na podłoże:

$$P = 0,0068 V_{\max}^2 \text{ [KG}\cdot\text{cm}^{-2}\text{]}$$

Prędkość (V_{\max}) określa się, stosując kamerę S-VHS Panasonic M800 z migawką 1/1000 s.

Następnie na magnetowidzie Panasonic FS-2000 można określić czas od wylotu kropli do próbki z dokładnością 2 klatek, co po przeliczeniu daje dokładność 0,04 s. Znając odległość od symulatora do próbki 1,3 m, a w odpowiednich cyklach pracy zabarwiając wodę, uzyskuje się błąd pomiaru czasu $\pm 5\%$, przy na przykład całkowitym czasie przelotu 0,4 s.

Stosując tę metodę, można również pomierzyć prędkość przepływu wody (cyklicznie zabarwiając częściowo próbkę) po powierzchni badanej próbki. Pozwala to jednocześnie na porównanie tej prędkości przy próbce pokrytej roślinnością i bez niej. Z prędkością tą jest związany proces przemieszczania się zerodowanego materiału na powierzchni próbki.

Możliwości pomiarowe opracowanego w IBMER symulatora umożliwiają ocenę globalną procesu odpajania i odrywania cząstek gruntu, a także prędkości ich przemieszczania w wyniku oddziaływania opadu w postaci kropli.

Metoda pomiaru mikrotwardości próbki poddawanej erodującemu działaniu opadu z symulatora

Badana próbka gruntu przed rozpoczęciem erodującego działania wody powinna być zagęszczona do określonego w metodyce badań wskaźnika I_s (np. 0,95). Wskaźnik ten jednak nie informuje o odporności na erozję wodną wierzchniej warstwy próbki powleczonej na przykład cienką błoną emulsji, która wnika w pory. Wobec powyższego założono, że w sposób pośredni odporność tę będzie można ocenić na podstawie twardości tej warstwy. Mając powyższe na uwadze, a zarazem definicję twardości podaną przez Katarzyńskiego i innych (1956): „Twardość jest miarą oporu, jaki wykazuje ciało w czasie wciskania weń drugiego ciała, lub twardość jest miarą odporności materiału przeciw odkształceniom trwałym, powstającym wskutek wciskania weń głębnika”, uznano słuszność przyjętego założenia w odniesieniu do erodującego działania kropli wody na powierzchnię próbki gruntu.

W praktyce inżynierskiej, na przykład budownictwa drogowego, stosuje się różnego rodzaju konstrukcje penetrometrów, które służą do badań zwięzłości gruntu powyżej 3 mm.

W przypadku nakładania hydromieszanin, których grubość po wyschnięciu wynosi około 1 mm, penetrometry nie mogą być stosowane.

Utwardzanie wierzchniej warstwy próbki o grubości około 3 mm następuje na skutek oddziaływania energii kinetycznej kropli wody czy też hydro-

mieszaniny, a również dzięki wnikaniu w pory tej warstwy koloidów i drobnych cząstek gruntu.

Wobec powyższego w przypadku hydromieszanin, których grubość po wyschnięciu wynosi około 1 mm, stosowane penetrometry nie mogą być używane.

W wyniku poszukiwań odpowiedniej metody pomiaru mikrotwardości wierzchniej warstwy próbki poddawanej erozji wodnej czy też powierzchni chronionej uprzednio różnymi technologiami przed erozją postanowiono zaadoptować znaną, stosowaną w technice badań własności mechanicznych metali metodę Brinella.

W tym też celu zbudowano penetrometr z kulistą końcówką na trzpieniu umieszczonym w rurowej obudowie z pierścieniem opierającym się na powierzchni próbki. Średnica kuli – 28 mm, maksymalna wysokość opadania kuli z trzpieniem – 188 mm, obciążenie statyczne – $P = 0,02$ kN, obciążenie dynamiczne – $P = 0,05$ kN. Pomiar przemieszczania kuli – czujnik indukcyjny z dokładnością $\pm 0,01$ mm.

Badana próbka powinna mieć znaną wilgotność oraz wskaźnik zagęszczenia (I_s). Wilgotność próbki może być określana przed pomiarem i po pomiarze specjalną sondą pomiarową.

Opierając się na znanych wzorach (m.in. postulacie Rejnera 1965), zaproponowano wzór (Wierzbicki i in. 1997), pozwalający określić mikrotwardość powierzchni próbki, czyli wytrzymałość na ściskanie (R_c) wierzchniej warstwy, na przykład przed nałożeniem i po nałożeniu warstwy ochronnej:

$$R_c = \frac{C}{43,96h - 1,0467h^3}$$

gdzie:

$$C = \frac{mV^2}{2g}$$

m – masa [kg],

V – prędkość opadania [$m \cdot s^{-1}$],

g – $9,81 m \cdot s^{-2}$,

h – głębokość zagłębienia kuli w podłożu [mm].

Przeprowadzone dotychczas badania wskazują, że metoda ta przy niektórych gruntach pozwala uzyskać dobrą powtarzalność (Wierzbicki in. 1997). Ponadto w sposób pośredni pozwala ona na ocenę procesu odspajania cząstek gruntu od podłoża.

Metoda pomiaru grubości optymalnej warstwy ochronnej z osadów ściekowych natrykiwanej hydrosiewnikiem na pochyłą powierzchnię gruntu

Metoda ta oparta jest na zależności grubości warstwy ochronnej proporcjonalnej do wartości progu płynięcia (τ_o) i odwrotnie proporcjonalnej do przyspieszenia ziemskiego (g), gęstości osadów czy innej mieszaniny (ρ) oraz kąta pochylenia natrykiwanej powierzchni (β), opisanej wzorem:

$$h = \frac{\tau_o}{g\rho \sin \beta}$$

Wzór ten podał Sziszczenko (1976), a następnie Sozański i inni (1997).

Zastosowanie w praktyce tego wzoru wiąże się koniecznością pomiaru progu płynięcia oraz gęstości i kąta pochylenia ochraniającej powierzchni.

Pomijając problemy pomiarowe związane z określeniem progu płynięcia (τ_0), to jak wykazali Sozański i Jeż-Walkowiak (1993), wartość jego zmienia się znacznie w zależności od czasu fermentacji. Wobec powyższego nie można stosować omawianego wzoru w praktyce.

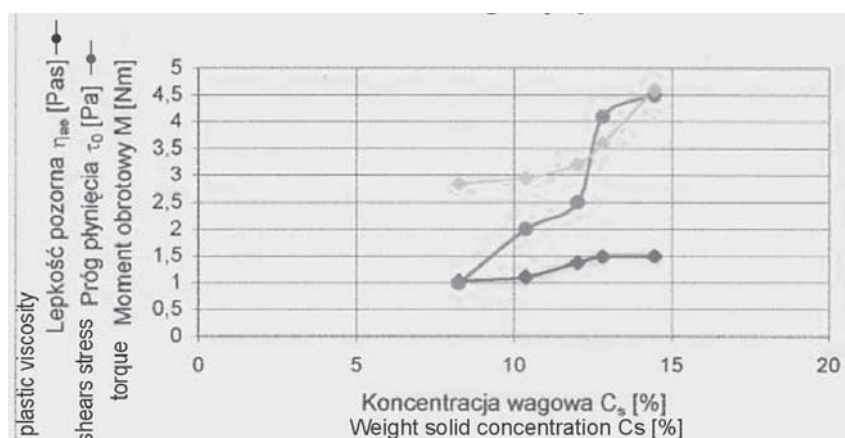
Wyniki badań nad poszukiwaniem bardziej pewnej metody

Poszukując bardziej pewnej metody określenia optymalnej grubości warstwy ochronnej na pochyłe powierzchnie gruntu metodą natrysku, przeprowadzono pomiary w specjalnie skonstruowanym mieszalniku. W mieszalniku tym, wypełnionym różnymi hydromieszaninami o kilku koncentracjach wagowych i określonych parametrach reologicznych, mierzono moment obrotowy na wale mieszadła. W wyniku przeprowadzonych badań (Wierzbicki i in. 1997, Borowy 2003) udokumentowano istnie-

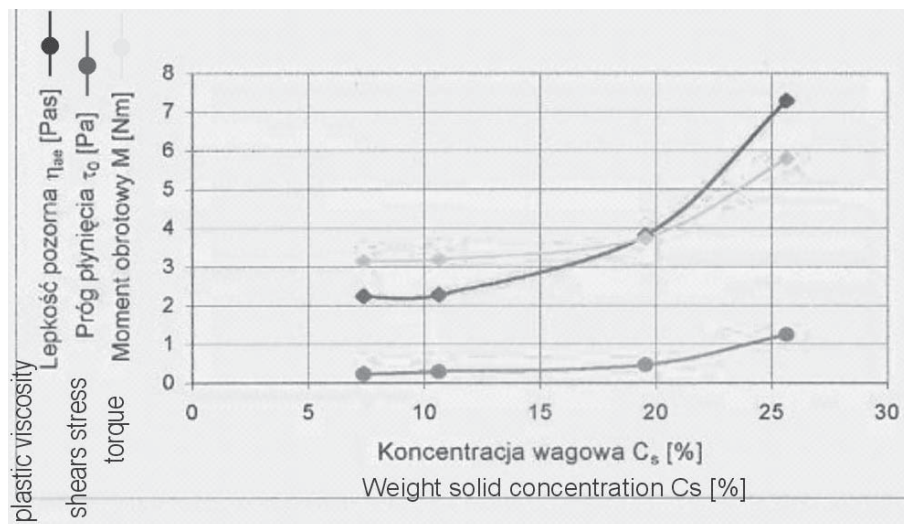
jące zależności, które uwidoczniło na rysunkach 1–3.

Dalsze badania, przeprowadzone przez Smilgina (2004), pozwoliły na opracowanie wykresu (rys. 4), przedstawiającego zależność między kątem nachylenia skarpy a maksymalną grubością natryskanej warstwy hydromieszanki z osadów celulozowych i celulozowo-komunalnych, przy której warstwa ta jest stabilna. Na wykresie tym widoczne są wyraźne zależności pomiędzy koncentracją wagową suchego składnika (C_s) a kątem β . Ponadto zastosowanie hydroobsiewu z osadów celulozowych pozwala na zastosowanie grubszej warstwy, która nie będzie spływać po nachylonej powierzchni skarpy.

Wykonując hydroobsiew hydrosiewnikiem z mieszadłem wyposażonym w momentomierz na wale napędowym, możemy ocenić przydatność mieszanki do jej zastosowania w celu ochrony przed erozją wodną danej powierzchni skarpy. Istnieją tu wyraźne zależności między koncentracją wagową suchego

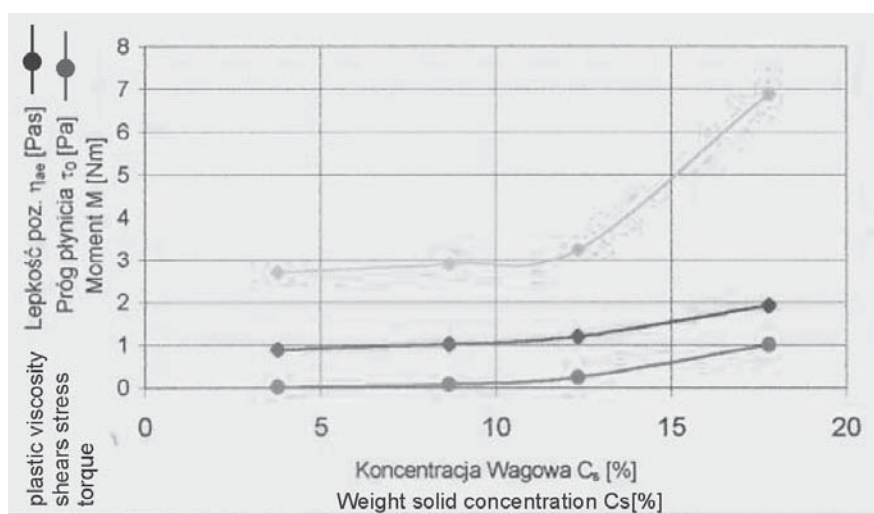


RYSUNEK 1. Wpływ koncentracji wagowej (C_s) na wartości parametrów reologicznych i momentu obrotowego dla osadów komunalnych prefermentowanych
 FIGURE 1. Influence of the weight solid concentration (C_s) on value of the rheological parameters and torque of the fermented municipal sludge



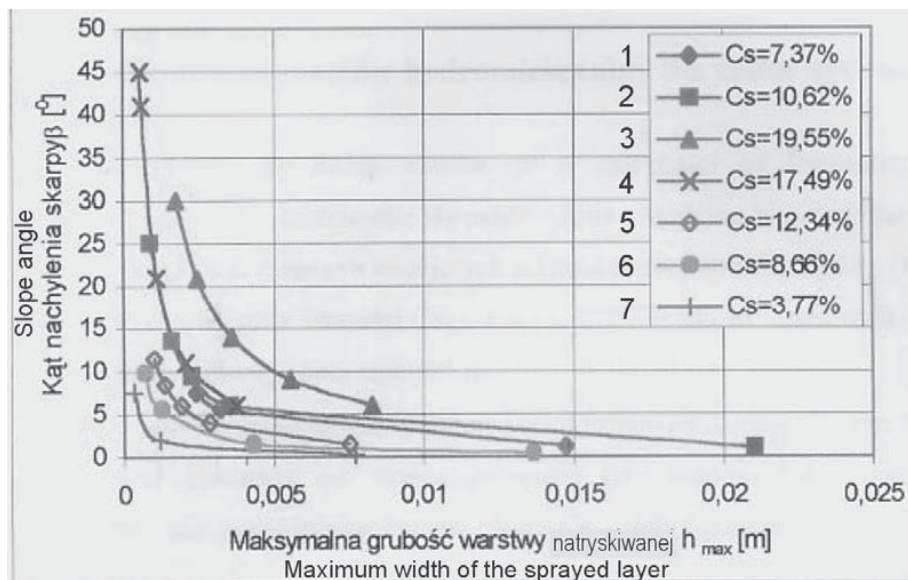
RYSUNEK 2. Wpływ koncentracji wagowej (C_s) na wartość parametrów reologicznych i momentu obrotowego dla osadów celulozowych (Borowy 2003)

FIGURE 1. Influence of the weight solid concentration (C_s) on value of the rheological parameters and torque of the cellulose ludeo



RYSUNEK 3. Wpływ koncentracji wagowej (C_s) na wartość parametrów reologicznych i momentu obrotowego dla osadów celulozowo-komunalnych (Borowy 2003)

FIGURE 3. Influence of the weight solid concentration (C_s) on value of the rheological parameters and torque of the cellulose-comune sludge (Borowy 2003)



RYSUNEK 4. Zależność maksymalnej grubości warstwy natryskiwanej od koncentracji osadów celulozowych (1, 2, 3) i celulozowo-komunalnych (4, 5, 6, 7) oraz kąta nachylenia skarpy (Smilgin 2004)
 FIGURE 4. Dependence of the maximum width of the sprayed layer on the cellulose and cellulose-commune sludge concentration and slope angle (Smilgin 2004)

składnika a momentem na wale mieszadła, lepkością pozorną i progiem płynięcia (rys. 1–3), a także koncentracją i grubością warstwy względem pochylenia skarpy (rys. 4).

W opisywanym doświadczeniu zastosowano pewne uproszczenie, polegające na pominięciu prędkości wsiąkania wody czy też ścieków w wierzchnią warstwę chronionej powierzchni skarpy.

Przy gruntach, gdzie prędkość wsiąkania będzie większa, w sposób naturalny zwiększy się koncentracja (C_s), a zatem nawet przy mniejszej koncentracji nałożona warstwa nie będzie spływać po skarpie. Założenie to stanowi pewnego rodzaju zabezpieczenie omawianej technologii hydroobsiewu. Opisane doświadczenie pozwala na zaproponowanie bardziej pewnej metody określania

grubości warstwy w porównaniu do opisanej w poprzednim rozdziale.

W praktyce minimalną dopuszczalną koncentrację można wyznaczyć doświadczalnie, wykonując próbny hydroobsiew osadami ściekowymi o koncentracji (C_s) około 15%. Jednocześnie należy zanotować wartość momentu na wale mieszadła hydrosiewnika. Obserwując zachowanie się warstwy ochronnej na skarpie, możemy podjąć decyzję o zwiększeniu koncentracji albo też pozostawieniu jej bez zmian.

Wówczas posługując się takim samym wskazaniem momentomierza, możemy kontynuować hydroobsiew. Jeśli wskazania momentomierza będą mniejsze, na przykład na skutek zmian parametrów reologicznych osadów ściekowych, wówczas trzeba zwiększyć koncentrację (C_s).

Podsumowanie

Opisane trzy metody umożliwiają bardziej dokładną ocenę procesu erozji wodnej gruntów antropogenicznych czy też gleb w warunkach laboratoryjnych. Ich wykorzystanie być może pozwoli na bardziej wszechstronny opis omawianego procesu.

Zaadoptowanie zmodyfikowanej metody pomiaru grubości natryskiwanej warstwy do praktyki powinno zapobiec niepowodzeniom, na jakie często natrafia się przy stosowaniu hydroobsiewu do zabezpieczenia pochylonych powierzchni gruntów przed erozją. Jednocześnie dobrze realizowana technologia hydroobsiewu może w sposób istotny przyczynić się do wykorzystania wielu materiałów klasyfikowanych jako odpady. Ponadto mając na uwadze koszty innych stosowanych dotychczas technologii zabezpieczenia skarp przed erozją, możliwe jest bardzo znaczne ich obniżenie poprzez zastosowanie hydrosiewnika wyposażonego w momentomierz na wale mieszadła.

Literatura

- BOROWY A. 2003: Dobór wybranych parametrów hydromieszanin w zastosowaniu do obsiewu pochyłych powierzchni. Praca doktorska. Prace naukowe IBMER 1 (6), Warszawa.
- HENESAL P., DUCHATEL F. 1990: Larodimetre a jets mobiles. *Buletin de Liason des Laboratoires des Ponts et Chansse's* 167: 47–52.
- JARRET A.R., HAMLETT J.M., GROSH J.L. 1994: Infiltration and erodibility of fly ash/sludge manufactured soil. *Translation of the ASEA* 37.
- JÓZEFACIUK A., JÓZEFACIUK Cz. 1992: Zarys morfologii klasyfikacji gleb. Pamiętnik Puławski. Suplement do zeszytu 101 Erozja wodna. IUNG, Puławy.
- JÓZEFACIUK A. i in. 1976: Techniczno-biologiczne obudowy skarp. Zeszyt 12. IUNG, Puławy.
- KATARZYŃSKI S., KOCANĀDA S., ZAKRZEWSKI M. 1956: Badanie właściwości mechanicznych metali. PWT, Warszawa.
- KINCAID D.C. 1997: Spraydrop kinetic energy from irrigation sprinklers. *Translation of the ASAE* 39: 847–853.
- LEBJEDIEW B. 1977: Deszczujące maszyny. Maszynostrojenje, Moskwa.
- MALDENHAUER W.C., KEMPER W.D. 1969: Interdependence of water drop energy and clod size on infiltration and clod stability. *Soil Sei of Am. Proc.* 33: 301–397.
- MORGAN R.P.C. 1986: Soil erosion and conservation. Lonyman Scientific Technical.
- REINER M. 1965: Reologia teoretyczna. PWN, Warszawa.
- SMILGIN Z. 2004: Kształtowanie reologicznych parametrów osadów ściekowych wykorzystywanych do biologicznego umacniania skarp. Praca doktorska. Instytut Inżynierii Środowiska AR, Wrocław.
- SOZAŃSKI M., JEŻ-WALKOWIAK J. 1993: Charakterystyki reologiczne osadów i ich znaczenie w rozwiązywaniu problemów projektowych i eksploatacyjnych. Konferencja Naukowo-Techniczna, Częstochowa.
- SOZAŃSKI M.M. i inni 1997: Rheological characterization, an useful tool for sludge management. I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Warszawa.
- SZISZCZENKO R.J. i inni 1976: Hydraulika przemysłowych cieczy. Nedra, Moskwa.
- VORIES E.D., von BERNUTH R.D. 1990: A laboratory study of the erodibility of disturbed soil. *Translation ASAE* 33: 1497–1502.
- WIERZBICKI K. i inni 1997: Rekultywacja utworów antropogenicznych metoda hydroobsiewu. Projekt badawczy nr P06F022508 KBN IBMER, Warszawa.

Summary

Chosen water erosion measurement methods of the sloped surface layers of anthropogenic formations. We elaborated three new methods enabling better evaluation of the process of loosening, detaching and transporting soil particles. These methods are as follows: method of the stimulated rain causing water erosion, method of the measurement of the sample microhardness where sample is exposing on the eroding action of the rain from stimulator, evaluation method

based on the measurement of the output torque from shaft of the hydroseeder mixer till the moment as we obtain stable hydromixture layer which is covered on the sloped surface of the embankment in dependence of the weight solid concentration.

Author's address:

Krzysztof Wierzbicki
Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa
ul. Rakowiecka 32, 02-532 Warszawa