

OCENA WARUNKÓW EROZJI OSADÓW W ZBIORNIKU SULEJÓW W REJONIE UJĘCIA WODY PITNEJ DLA MIASTA ŁODZI

Jan Kempieński, Włodzimierz Parzonka

Akademia Rolnicza we Wrocławiu

Streszczenie. Wyznaczono parametry fizyczne, reologiczne i sedymentacyjne dwóch charakterystycznych prób osadów pobranych ze zbiornika Sulejów w rejonie ujęcia wody pitnej dla miasta Łodzi. Do badań reologicznych użyto wiskozymetru rotacyjnego Rheotest 2, typu Couette'a-Searle'a. Określono graniczną koncentrację objętościową osadów, wynoszącą odpowiednio 1,4 i 1,8%, a z zależności Migniota obliczono koncentrację rozgraniczającą erozję łatwą i trudną. Na podstawie badań sedymentacyjnych ustalono charakterystyczne czasy osiadania osadów. Obliczono także średnie prędkości krytyczne strumienia wody powodujące erozję wierzchniej warstwy osadów, równe odpowiednio 1,16 i 1,36 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Przy średniej wydajności ujęcia wody wynoszącej ok. $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ strumień wody dopływa do ujęcia ze średnią prędkością równą $0,0154 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; wartość ta jest ok. 80-krotnie mniejsza od prędkości średniej powodującej erozję osadów. A zatem, osad spoisty w rejonie ujęcia wody już po 2–3 dniach zagęszczania nie będzie erodowany przez strumień wody ujmowany dla miasta.

Słowa kluczowe: reologia, sedymentacja, zagęszczanie osadu, erozja hydrauliczna

WSTĘP

Zbiornik wodny Sulejów o pojemności całkowitej ok. 75 mln m^3 , zbudowany na rzece Pilicy w 1973 r., pozwala na zaopatrzenie Łodzi w wodę pitną. Z ujęcia w Bronisławowie potrzebna ilość wody dostarczana jest do stacji uzdatniania w Kalinku, a stamtąd do miasta. Roczne zapotrzebowanie wody dla aglomeracji łódzkiej wynosi ok. 50–60 mln m^3 , co odpowiada poborowi wody przez ujęcie (Q) rzędu $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Ujęcie wody znajduje się na tzw. doprowadzalniku będącym sztuczną zatoką o długości ok. 1 km, położoną na lewym brzegu akwenu w odległości równej ok. 1/3 jego długości, licząc od zapory zbiornika. Szerokość doprowadzalnika zmniejsza się od ok. 500 m

przy wlocie do 150 m w partii środkowej i 60 m w pobliżu ujęcia. Dno w osi doprowadzalnika jest poziome. Przekroje poprzeczne mają kształt trapezowy, a skarpy są naturalne. Brzegi doprowadzalnika pokrywa skąpa roślinność (trawy, krzewy). Plażę, która odsłania się przy wahaniami napełnienia zbiornika, pokrywa piasek. Nad zbiornikiem niekiedy wieją silne i bardzo silne wiatry z kierunków południowo-wschodnich, wywołujące fale o długości rozbiegu ok. 3 km.

Charakterystyczne rzędne zbiornika to:

- dno doprowadzalnika przy ujęciu – 160,50 m n.p.m.,
- maksymalny poziom piętrzenia – 166,50 m n.p.m.,
- minimalny poziom piętrzenia (nie ograniczający pracy ujęcia) – 163,60 m n.p.m.

Zdaniem użytkownika zbiornika, nie istnieje problem zakłócania pracy ujęcia wskutek zamulania doprowadzalnika, wpływ na jakość wody i stan rurociągów dosyłowych ma natomiast eutrofizacja wody w zbiorniku i doprowadzalniku [Ustalenie... 1991].

Po względem jakości woda w zbiorniku została zakwalifikowana do klasy II–III, co zmusza do wprowadzenia odpowiednich rygorów użytkowania gruntów zarówno w strefie ochrony sanitarnej zbiornika, jak i w całej jego zlewni. Z powodu zwiększenia się mętności wody pobieranej z ujęcia w Bronisławowie użytkownik zlecił badania mające wyjaśnić przyczynę takiego stanu rzeczy. Jedną z hipotez zakładała erozję hydrauliczną osadów zalegających w rejonie ujęcia wody. Aby sprawdzić słuszność tej hipotezy, przeprowadzono badania parametrów fizycznych, sedymentacyjnych i reologicznych dwóch charakterystycznych prób osadów zalegających w doprowadzalniku oraz oceniono możliwości ich erozji hydraulicznej na skutek pracy ujęcia wody w Bronisławowie.

MATERIAŁ I METODY

Próby osadów pobrano z zatoki ujęcia wody (próby nr 1, 2, 3, 5 i 6) oraz z samej czaszy zbiornika (próba nr 4), w odległości 500 m przed wlotem do doprowadzalnika. Makroskopowo stwierdzono, że próby nr 1 i 3 mają cechy osadów spoistych, a próby nr 2, 5, 6 i 4 są typowymi osadami piaszczystymi (niespoistymi). Osady spoiste były pobrane w nurcie zatoki, na trasie przepływu strumienia pobieranej wody. Próby nr 2, 5 i 6 pochodziły z odsłoniętych brzegów zatoki, gdzie prawdopodobnie zostały osadzone w wyniku erozji wietrznej lub wodnej materiałów naniesionych z terenu przyległego do zbiornika. Próba nr 4 reprezentowała typowe rumowisko piaszczyste, transportowane przez rzekę i zatrzymywane w czaszy zbiornika.

Określano następujące właściwości fizyczne osadów: gęstość cząstek stałych (ρ_s), nominalną wielkość ziarna (d_{50}), zawartość części organicznych (I_o), naturalną koncentrację objętościową ($C_{v,n}$), wilgotność naturalną (W_n), wilgotność odpowiadającą granicy Atterberga (W_{LL}), koncentrację objętościową odpowiadającą granicy Atterberga ($C_{v,LL}$) oraz gęstość gruntu nasyconego w stanie naturalnym (ρ_m).

Badania przebiegu procesu sedymentacji i zagęszczania osadów przeprowadzono w kalibrowanych cylindrach o pojemności jednego litra, zgodnie z metodyką opisaną we wcześniejszej pracy [Parzonka i Kempański 1991]. Aż do zakończenia procesu zagęszczania obserwowano powierzchnię rozdziału wody nadosadowej i warstwy osadu.

Badaniom reologicznym poddano osady spoiste (próby nr 1 i 3), zawierające znaczną ilość części organicznych (patrz tab. 1). Zastosowano metodykę podaną we wcześniejszym opracowaniu [Kempiński 1999]. Zakres badań reologicznych ograniczono do wyznaczenia progu płynięcia osadów (τ_0) dla szeregu różnych koncentracji objętościowych. Pomiary wiskozymetryczne wykonano w strefie nienewtonowskiego zachowania się mieszaniny, dla koncentracji objętościowej przekraczającej koncentrację graniczną ($C_{V,lim}$) odpowiadającą przejściu z newtonowskiego do nienewtonowskiego zachowania się mieszaniny.

WYNIKI BADAŃ

Właściwości fizyczne

Obie próby osadów spoistych (nr 1 i 3) miały zbliżone cechy fizyczne (tab. 1). Nominalna wielkość ziarna wynosiła ok. 20 μm . Z powodu dużej zawartości części organicznych (ok. 25%) gęstość cząstek stałych była stosunkowo niewielka, rzędu 2460–2480 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Na podstawie wartości badanych parametrów stwierdzono, że osady te są typowymi osadami pylasto-piaszczystymi.

Tabela 1. Parametry fizyczne prób osadów spoistych ze zbiornika Sulejów
Table 1. Physical parameters of cohesive mud samples from reservoir Sulejów

| Próba Sample | ρ_s $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | d_{50} mm | I_o % | $C_{V,n}$ % | W_n % | W_{LL} % | $C_{V,LL}$ % | ρ_m $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ |
|-----------------|---|----------------|------------|----------------|------------|---------------|-----------------|---|
| 1 | 2478,50 | 0,018 | 23,30 | 10,02 | 362,10 | 201,20 | 16,70 | 1144,97 |
| 3 | 2460,30 | 0,022 | 26,10 | 11,51 | 312,40 | 182,80 | 18,19 | 1158,28 |

ρ_s – gęstość cząstek stałych – density of solid particles

d_{50} – nominalna wielkość ziarna – nominal grain size

I_o – zawartość części organicznych – organic matter content

$C_{V,n}$ – naturalna koncentracja objętościowa – natural volumetric concentration

W_n – wilgotność naturalna – natural humidity

W_{LL} – wilgotność odpowiadająca granicy Atterberga – humidity corresponding to Atterberg limit

$C_{V,LL}$ – koncentracja objętościowa odpowiadająca granicy Atterberga – volumetric concentration corresponding to Atterberg limit

ρ_m – gęstość gruntu nasyconego w stanie naturalnym – density of saturated sediment in natural state

Właściwości fizyczne prób osadów piaszczystych (nr 2, 5, 6 i 4) również były zbliżone. Nominalna wielkość ziarna (d_{50}) wynosiła od 320 do 400 μm , a gęstość cząstek stałych (ρ_s) we wszystkich próbach była identyczna, równa 2650 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Zawartość części organicznych (I_o) była śladowa, nie przekraczała 1%. Wszystkie próbki osadów niespoistych zakwalifikowano do piasków średnich.

Właściwości sedymentacyjne

W przypadku gruntów piaszczystych warstwa osadu zagęściła się bardzo szybko, praktycznie w ciągu 1 godziny, dlatego podstawowym badaniom sedymentacyjnym poddano wyłącznie próby osadów spoistych (nr 1 i 3). Obserwacje procesu sedymentacji i zagęszczania prowadzono w znacznie dłuższym czasie niż dla osadów niespoistych, a mianowicie przez 22 dni. Proces przebiegał o wiele wolniej i to przy obu wartościach koncentracji początkowej (T_{S0}) każdej z prób. Wartości te osiągnięto, rozcieńczając wodą próby wyjściowe w stosunku 1:2 i 1:4. Charakterystyczne parametry sedymentacji badanych prób zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry sedymentacji osadów spoistych ze zbiornika Sulejów
Table 2. Sedimentation parameters of cohesive muds from reservoir Sulejów

| Próba Sample | Cylinder | C_V % | T_{S0} $\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ | $T_{S,lim}$ $\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ | $T_{S,e}$ $\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ | $T_{S,n}$ $\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ | $T_{S,LL}$ $\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ | t_{lim} min | t_e min |
|-----------------|----------|------------|---|--|--|--|---|------------------|--------------|
| 1 | 1 | 5,01 | 123,92 | 34,70 | 86,70 | 247,84 | 414,00 | 0 | 65 |
| | 2 | 2,50 | 61,96 | | | | | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 5,75 | 141,45 | 44,30 | 110,70 | 282,90 | 448,00 | 0 | 170 |
| | 2 | 2,87 | 70,73 | | | | | 0 | 0 |

C_V – koncentracja objętościowa – volumetric concentration

T_{S0} – początkowa koncentracja wagowa – initial mass concentration

$T_{S,lim}$ – graniczna koncentracja wagowa – limit mass concentration

$T_{S,e}$ – erozyjna koncentracja wagowa – mass concentration corresponding to transition from easy to hard erosion

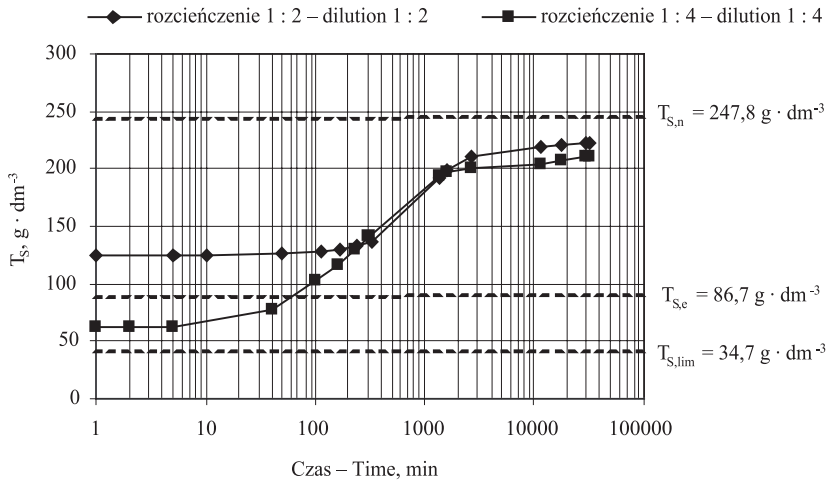
$T_{S,n}$ – naturalna koncentracja wagowa – natural mass concentration

$T_{S,LL}$ – koncentracja wagowa odpowiadająca granicy Atterberga – mass concentration corresponding to Atterberg limit

t_{lim} – czas osiągnięcia $T_{S,lim}$ – time to reach $T_{S,lim}$

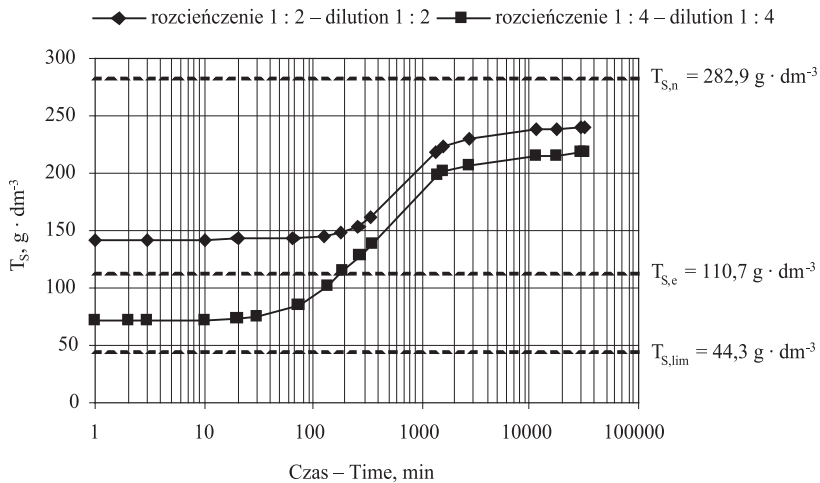
t_e – czas osiągnięcia $T_{S,e}$ – time to reach $T_{S,e}$

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono przebieg zależności koncentracji wagowej osadów od czasu sedymentacji. We wszystkich czterech przypadkach badane mieszaniny miały cechy cieczy nienewtonowskich. Początkowe wartości koncentracji wagowej były wyższe od odpowiadających im wartości koncentracji granicznej ($T_{S,lim}$). Jak widać z rysunków, proces sedymentacji trwał ok. 40–100 minut. W następnej fazie, kończącej się po 2–3 tysiącach minut, tj. po upływie 1,5–2 dni, następowało znaczne spowolnienie tego procesu. Koncentracja końcowa po 22 dniach zawierała się w przedziale 200–250 $\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$, co odpowiadało koncentracji objętościowej (C_V) w granicach 9–9,5%. Wartości te były niższe od wartości naturalnej koncentracji objętościowej ($C_{V,n}$) osadu, równych 10,02 i 11,51%.



Rys. 1. Zależność $T_s = f(\log t)$ dla osadów spoiстых – próba 1; T_s – koncentracja wagowa, t – czas

Fig. 1. Relation $T_s = f(\log t)$ for cohesive muds – sample 1; T_s – mass concentration, t – time



Rys. 2. Zależność $T_s = f(\log t)$ dla osadów spoiowych – próba 3; T_s – koncentracja wagowa, t – czas

Fig. 2. Relation $T_s = f(\log t)$ for cohesive muds – sample 3; T_s – mass concentration, t – time

Właściwości reologiczne

Uzyskane pseudokrzywe płynięcia badanych osadów (nie zamieszczone w tekście) były charakterystyczne dla reostabilnych ciał plastyczno-lepkich. Takie krzywe płynięcia można aproksymować jednym z trzyparametrowych modeli reologicznych uwzględniających próg płynięcia, np. modelem Vočadli:

$$\tau = \left(\tau_0^n + K \dot{G}_p \right)^n \quad \text{dla } \tau \geq \tau_0 \quad (1)$$

$$\dot{G}_p = 0 \quad \text{dla } \tau < \tau_0 \quad (2)$$

gdzie:

- τ – naprężenie styczne,
- τ_0 – próg płynięcia,
- \dot{G}_p – prędkość deformacji,
- K, n – współczynniki reologiczne.

Trzyparametrowy uogólniony model reologiczny Vočadli był wcześniej stosowany m.in. w pracach dotyczących namulów koryta rzeki Odry [Parzonka i in. 1993, 1997, Głowski i in. 1995].

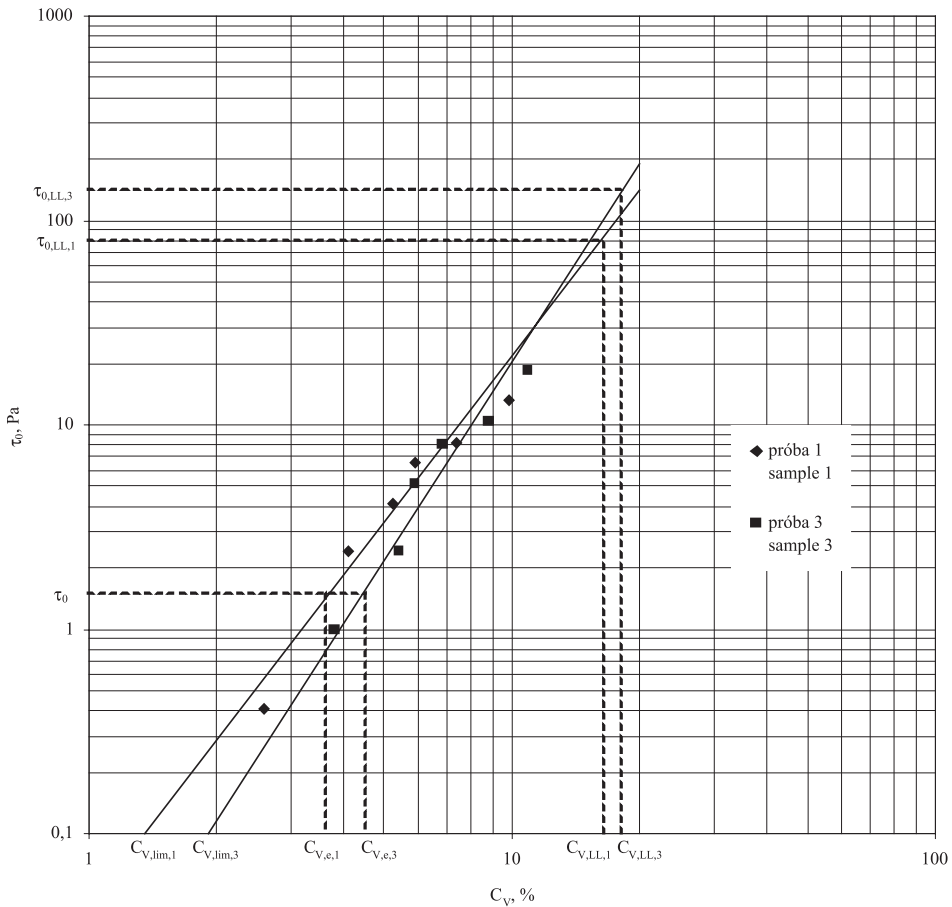
Koncentracja graniczna

Do scharakteryzowania procesu sedymentacji i erozji osadów konieczna jest w szczególności znajomość związku między progiem płynięcia (τ_0) a koncentracją objętościową (C_v). Zależność tę dla badanych próbek przedstawiono w układzie dwulogarytmicznym na rysunku 3. Wyraźnie widać, że wraz ze wzrostem wartości C_v obu prób zwiększa się wartość τ_0 .

Na podstawie wykresu zależności $\log \tau_0 = f(\log C_v)$ wyznaczono graniczną koncentrację objętościową ($C_{v,lim}$) badanych osadów [Parzonka 1977]. Wartości te wyniosły 1,4% dla próby nr 1 i 1,8% dla próby nr 3.

Zmierzone bezpośrednio wartości progu płynięcia ($\tau_{0,n}$) prób o naturalnej koncentracji objętościowej ($C_{v,n}$) są równe odpowiednio 13,10 Pa (próba nr 1) i 18,27 Pa (próba nr 3). Dla porównania, wartości $\tau_{0,n}$ wierzchniej warstwy osadów zgromadzonych w zbiorniku retencyjnym Sautet, położonym w południowo-wschodniej Francji, wynosiły od 60 do 94 Pa [Parzonka 1977].

Badane osady miały próg płynięcia znacznie wyższy od podanej przez Migniota wartości $\tau_0 = 1,5$ Pa, rozgraniczającej reżim hydraulicznej erozji łatwej i trudnej [Keller i Bouchard 1986]. Według wspomnianego autora, namuły mogą być łatwo wymywane przez strumień płynącej wody (erozja hydrauliczna), jeżeli wartość τ_0 materiału osadowego nie przekracza 1–2 Pa, średnio 1,5 Pa. Granicznymi wartościami koncentracji objętościowej ($C_{v,e}$), przy których możliwa jest łatwa erozja osadów, są zatem wartości odpowiadające $\tau_0 = 1,5$. W przypadku badanych prób wynoszą one 3,5% dla próby nr 1 i 4,5% dla próby nr 3 (rys. 3).



Rys. 3. Zależność $\tau_0 = f(C_v)$; τ_0 – próg płynięcia, C_v – koncentracja objętościowa

Fig. 3. Relation $\tau_0 = f(C_v)$; τ_0 – yield stress, C_v – volumetric concentration

Charakterystyczne czasy procesu zagęszczania

Czasy charakteryzujące proces zagęszczania można określić, łącząc wyniki badań sedymentacyjnych i reologicznych [Parzonka i Kempniński 1991]. Ustalono na podstawie badań reologicznych wartości granicznej koncentracji wagowej, odpowiadającej przejściu z reżimu newtonowskiego do nienewtonowskiego ($T_{S,lim}$), oraz koncentracji wagowej odpowiadającej przejściu z erozji łatwej do trudnej ($T_{S,e}$) naniesiono na wykresy zależności $T_S = f(\log t)$ (rys. 1 i 2), a następnie wyznaczono czasy osiągnięcia tych charakterystycznych koncentracji wagowych – t_{lim} i t_e . Odpowiednie wartości dla próby nr 1 wynoszą: $t_{lim} = 0$ (mieszanki mają cechy nienewtonowskie), $t_e = 0-65$ min, a dla próby nr 3: $t_{lim} = 0$, $t_e = 0-170$ min.

Warunki erozji hydraulicznej osadów spoistych i niespoistych

Zjawisko hydraulicznej erozji osadów ma zróżnicowaną postać w zależności od ich koncentracji wagowej [Keller i Bouchard 1986]:

– przy małej koncentracji, $T_S < T_{S,lim}$, zawiesina osadu zachowuje się jak płyn lepki. Powierzchnia graniczna z wodą przedstawia sobą fale nieciągłości, które wytwarzają znaczne siły przy większej prędkości strumienia wody;

– przy średniej koncentracji, $T_S > T_{S,lim}$, cząstki stałe są wprowadzane w stan zawieszony wskutek wrywania „obłoków” osadu. Zamiast wyraźnej nieciągłości występuje gradient koncentracji od dna ku powierzchni;

– przy dużej koncentracji, $T_S \gg T_{S,lim}$ (osady osadzone od kilku tygodni do kilku miesięcy), początek wprawienia osadów w ruch przedstawia się jako wymywanie flokuł lub pakietu ziarn, a przy bardzo dużej koncentracji nawet grudek. Agregaty te dość trudno rozciągają się w strumieniu wody. Zwykle erozja postępuje zgodnie z kierunkiem przepływu.

Proces erozji wierzchniej warstwy osadów był badany głównie w warunkach laboratoryjnych. Migniot [cyt. za: Keller i Bouchard 1986] wyznaczył zależność krytycznej prędkości dynamicznej (v_{*KR}) od koncentracji wagowej (T_S) oraz ogólniejszą zależność tej prędkości od progu płynięcia (τ_0). Stwierdził, że istnieją dwa reżimy erozji wodnej, odpowiadające dwóm stanom (etapom) konsolidacji – słabo skonsolidowanych osadów oraz silniej zagęszczonych namulów:

$$1. \text{ dla } T_S < 300\text{--}350 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \quad v_{*KR} = kT_S \quad (3)$$

$$2. \text{ dla } T_S > 300\text{--}350 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \quad v_{*KR} = kT_S^n \quad (4)$$

gdzie: k, n – parametry równania.

Odpowiednia zależność $v_{*KR}(\tau_0)$ ma następującą postać:

1. dla $\tau_0 < 1,5 \text{ Pa}$

$$v_{*KR} \approx 0,0178\tau_0^{0,25}$$

2. dla $\tau_0 > 1,5 \text{ Pa}$

$$v_{*KR} \approx 0,016\tau_0^{0,5}$$

Jeżeli τ_0 będzie wyrażone w paskalach, to otrzymamy v_{*KR} wyrażone w $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Prędkość dynamiczną opisuje znany wzór:

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_h}{\rho_w}} \quad (5)$$

gdzie:

τ_0 – naprężenie styczne na głębokości h ,

ρ_w – gęstość wody.

Wzór ten dla warunków krytycznych ma postać:

$$v_{*KR} = \sqrt{\frac{\tau_{h,KR}}{\rho_w}} \quad (6)$$

Migniot obliczył, że:

dla $\tau_0 > 1,5$ Pa

$$\tau_{h,KR} \approx 0,256\tau_0 \quad (7)$$

dla $\tau_0 < 1,5$ Pa

$$\tau_{h,KR} \approx 0,317\tau_0^{0,5} \quad (8)$$

Naprężenie styczne w dnie, wywołane przez strumień wody, przedstawia znana formuła:

$$\tau_h = \rho_w g R_h I \quad (9)$$

gdzie:

I – spadek hydrauliczny,

R_h – promień hydrauliczny.

Prędkość średnia strumienia jest określona wzorem Chézy'ego:

$$v_{SR} = C \sqrt{R_h I} \quad (10)$$

gdzie: C – współczynnik prędkości.

Warunki ścinania stropu osadów opisuje się z reguły prędkością dynamiczną. Po podstawieniu wzoru (5) do wzoru (9) otrzymamy:

$$v_* = \sqrt{g R_h I} \quad (11)$$

Z porównania wzorów na prędkość średnią (10) i prędkość dynamiczną (11) wynika, że:

$$v_{SR} = v_* \frac{C}{\sqrt{g}} = v_* \cdot 0,32C \quad (12)$$

Ponieważ wartość współczynnika C , odpowiadająca przepływowi w rzekach naturalnych, wynosi od 50 do 75, zatem $v_{SR} = v_* \cdot (16 \div 24)$, średnio $v_{SR} = 20v_*$.

Z przedstawianych badań wynika, że próg płynięcia osadu w stanie naturalnym ($\tau_{0,n}$) o koncentracji objętościowej 10,02 i 11,51% wynosi odpowiednio 13,10 i 18,27 Pa (patrz tab. 3). Naprężenia te przekraczają znacznie graniczną wartość $\tau_{0,e} = 1,5$ Pa, odpowiadającą przejściu z erozji łatwej do erozji trudnej. W przypadku badanych osadów do zapoczątkowania zjawiska erozji potrzebne są naprężenia styczne (τ_h) przekraczające wartość $\tau_{h,KR} = 0,256\tau_0$, tj. odpowiednio 3,35 Pa dla próby nr 1 i 4,66 Pa dla próby nr 3. Znając $\tau_{h,KR}$ oraz ρ_w , obliczamy v_{*KR} i $v_{SR,KR}$ ze wzorów (6) i (12).

Parametry erozji badanych osadów dla różnej koncentracji objętościowej zestawiono w tabeli 3, a zależność krytycznej prędkości dynamicznej od tej koncentracji przedstawiono na rysunku 4.

Tabela 3. Parametry erozji osadów spoistych ze zbiornika Sulejów (obliczone na podstawie zależności Migniot)

Table 3. Erosion parameters of cohesive muds from reservoir Sulejów (calculated on basis of Migniot formula)

| Próba Sample | C_V % | $C_{V,lim}$ % | $C_{V,e}$ % | τ_0 Pa | $\tau_{0,LL}$ Pa | $\tau_{h,KR}$ Pa | v_{*KR} $m \cdot s^{-1}$ | $v_{SR,KR}$ $m \cdot s^{-1}$ | Uwagi Remarks |
|------------------------------|------------|------------------|----------------|----------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------|--|
| 1 $C_{V,n} = 10,02\%$ | 10,02 | | | 13,10 | | 3,35 | 0,058 | 1,16 | |
| | 7,40 | | | 8,23 | | 2,11 | 0,046 | 0,92 | reżim erozji trudnej |
| | 5,90 | | | 6,50 | | 1,66 | 0,041 | 0,82 | regime of hard |
| | 5,20 | 1,40 | 3,50 | 4,11 | 80,00 | 1,05 | 0,032 | 0,65 | erosion |
| | 4,10 | | | 2,39 | | 0,61 | 0,025 | 0,49 | |
| | 2,60 | | | 0,41 | | 0,20 | 0,014 | 0,28 | reżim erozji łatwej regime of easy erosion |
| 3 $C_{V,n} = 11,51\%$ | 10,90 | | | 18,27 | | 4,68 | 0,068 | 1,37 | |
| | 8,80 | | | 10,37 | | 2,65 | 0,052 | 1,03 | reżim erozji trudnej |
| | 6,90 | | | 7,98 | | 2,04 | 0,045 | 0,90 | regime of hard |
| | 5,90 | 1,80 | 4,50 | 5,10 | 125,00 | 1,30 | 0,036 | 0,72 | erosion |
| | 5,40 | | | 2,39 | | 0,61 | 0,025 | 0,49 | |
| | 3,80 | | | 0,99 | | 0,32 | 0,018 | 0,35 | reżim erozji łatwej regime of easy erosion |

C_V – koncentracja objętościowa – volumetric concentration

$C_{V,lim}$ – graniczna koncentracja objętościowa – limit volumetric concentration

$C_{V,e}$ – koncentracja rozgraniczająca erozję łatwą od trudnej – concentration corresponding to transition from easy to hard erosion

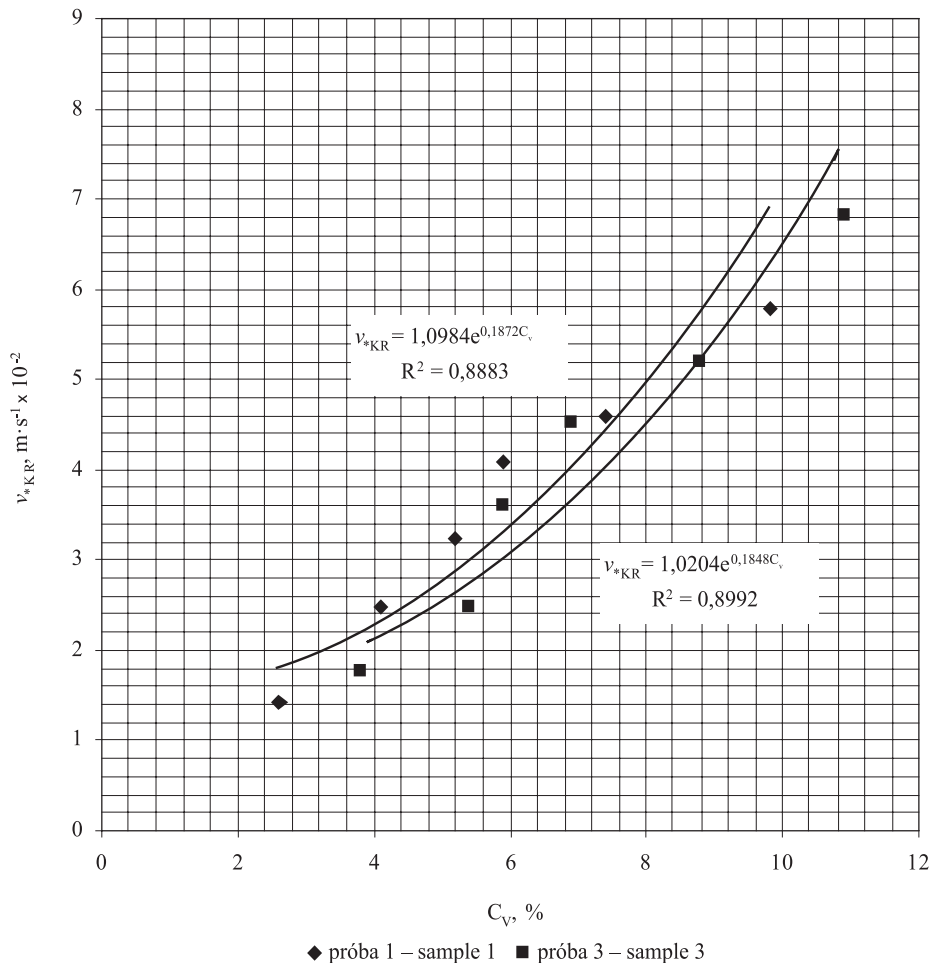
τ_0 – próg płynięcia – yield stress

$\tau_{0,LL}$ – próg płynięcia odpowiadający granicy Atterberga – yield stress corresponding to Atterberg limit

$\tau_{h,KR}$ – krytyczne naprężenie styczne – critical tangential stress

v_{*KR} – krytyczna prędkość dynamiczna – critical dynamic velocity

$v_{SR,KR}$ – średnia prędkość krytyczna – mean critical velocity



Rys. 4. Zależność $v_{*KR} = f(C_v)$; v_{*KR} – krytyczna prędkość dynamiczna, C_v – koncentracja objętościowa

Fig. 4. Relation $v_{*KR} = f(C_v)$; v_{*KR} – critical dynamic velocity, C_v – volumetric concentration

Wartości v_{*KR} dla osadów o koncentracji naturalnej wynoszą $0,058 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dla próby nr 1 i $0,068 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dla próby nr 3. Odpowiadające tym wartościom średnie prędkości strumienia wody, które spowodują zerwanie namułu spoistego z dna ($v_{SR,KR} = 20v_{*KR}$), wynoszą $1,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dla próby nr 1 i $1,37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dla próby nr 3.

Ponieważ powierzchnia przekroju poprzecznego doprowadzalnika (F) w rejonie ujęcia wody wynosi 130 m^2 , a pobór wody (Q) jest rzędu $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, średnia prędkość jej strumienia ($v_{SR} = Q/F$) wynosi $0,015 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jak widać, prędkość strumienia wody w rejonie ujęcia jest znacznie (75–88 razy) mniejsza od średnich prędkości krytycznych, jakie mogłyby spowodować wystąpienie erozji dna doprowadzalnika.

Z przeprowadzonych badań wynika również, że osad spoisty występujący w zatoce ujęcia wody Sulejów już po 2–3 godzinach sedymentacji i zagęszczania warstwy dennej nie może być erodowany hydraulicznie przez strumień wody pobieranej przez ujęcie dla miasta Łodzi.

PODSUMOWANIE

Z analizy wstępnych wyników badań procesu osadzania rumowiska unoszonego i wleczonego w zbiorniku Sulejów wynika, że rzeka Pilica i jej dopływy doprowadzają do zbiornika osady niespoiste (średni piasek) i rumowisko spławialne (namuły pylaste).

W zależności od rodzaju powodzi, ilości i rodzaju rumowiska transportowanego przez wielką wodę oraz poziomu zwierciadła wody w zbiorniku przy przejściu fali powodziowej rumowisko to może się zatrzymać w różnych punktach zbiornika. Występuje wyraźna tendencja do unoszenia drobnych cząstek stałych (spławialnych) wzdłuż osi zbiornika i jego lewego brzegu w kierunku czynnego ujęcia wody dla miasta Łodzi oraz do upustów dennych zapory zbiornika. Dokładniejszy opis zjawiska wymaga jednak dalszych badań dotyczących natężenia przepływu wody (Q_w) i rumowiska (Q_s) w czasie powodzi, a także pełniejszej ilościowej i jakościowej charakterystyki rumowiska doprowadzanego do zbiornika oraz gospodarki wodnej w obiekcie (w szczególności wahań zwierciadła wody w zbiorniku i wydajności urządzeń zrzutowych podczas powodzi).

Nie ulega wątpliwości, że namuły spoiste osadzone w zatoce ujęciowej i na jej przedpolu są skutkiem przejścia fali powodziowej i zostały przemieszczone do zbiornika przez rzekę Pilicę i jej dopływy. Osady te mają zbliżony charakter do namulów spoistych osadzonych w górnej i dolnej części zbiornika poza zatoką ujęciową.

Badania wykazały, że cząstki spławialne sedymentują i zagęszczają się dość szybko. Po upływie kilku godzin do kilku dni od początku procesu zagęszczania nie jest już możliwe zerwanie cząstek osadu spoistego przez strumień wody wywołany jej poborem przez ujęcie. W czasie powodzi cząstki spławialne wpływające do zatoki nie zdążą jednak osadzić się w jej obrębie wskutek łącznego działania przepływu wywołanego powodzią (wzrost poziomu wody) oraz poboru wody przez ujęcie, co stanowi przyczynę wystąpienia znacznego zmętnienia pobieranej wody.

Dodatkowym dowodem na istnienie wyraźnego związku między ilością wody transportującej rumowisko spławialne z Pilicy a jakością wody pobieranej przez ujęcie dla Łodzi jest istotny wzrost mętności wody w komorze sit i w rurociągu ujęciowym w czasie przejścia powodzi przez zbiornik. Analiza wyników pomiarów mętności na przykład w komorze sit wykazała, że największa mętność pobieranej wody występuje w lutym i marcu, tj. podczas powodzi roztopowych. Minima zmętnienia wody obserwuje się w okresach pozapowodziowych [Ustalenie... 1991].

PIŚMIENNICTWO

Głowski R., Kempiański J., Parzonka W., 1995. Zamulanie koryta rzeki Odry powyżej stopnia Brzeg Dolny. Zesz. Nauk. AR Wroc., Konferencje 10, t. 2, 43–53.

- Keller P., Bouchard J.P., 1986. Étude bibliographique de l'alluvionnement des retenues par les sédiments fins; Mécanismes physiques et moyens de lutte. EDF, Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, Serie A, Nucléaire, Hydraulique, Thermique 1, 25–57.
- Kempiński J., 1999. Metoda wyznaczania parametrów reologicznych dla namulów rzecznych. Zesz. Nauk. AR Wroc., Konferencje 23, 177–183.
- Parzonka W., 1977. Hydrauliczne podstawy transportu rurowego mieszanin dwufazowych, [Hydraulic bases for pipe transport of two-phase mixtures]. Wyd. AR we Wrocławiu.
- Parzonka W., Kempieński J., 1991. Reologiczna ocena procesu sedymentacji i osadzania namulów jeziornych. Zesz. Nauk. AR Wroc., Melioracje 39, 177–187.
- Parzonka W., Kempieński J., Eckstädt H., 1997. Physical and rheological features of liquid river mud. Zesz. Nauk. AR Wroc., Konferencje 16, t. 1, 135–145.
- Parzonka W., Kempieński J., Głowski R., 1993. Ocena wpływu geometrii koryta rzeki Odry i sposobu eksploatacji jazu w Brzegu Dolnym na warunki erozji namulów z górnego stanowiska. Zesz. Nauk. AR Wroc., Inż. Środ. 4, 57–66.
- Ustalenie warunków ochrony zbiornika sulejowskiego przed przyspieszonymi procesami eutrofizacji ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk strefy przydennej łącznie z osadami, 1991. Praca zbior. Instytut Ochrony Środowiska Wrocław, maszynopis.

ASSESSMENT OF MUD EROSION CONDITIONS IN STORAGE RESERVOIR SULEJÓW IN AREA OF DRINKING WATER INTAKE FOR ŁÓDŹ TOWN

Abstract. The study investigates the physical, rheological and sedimentation parameters of two characteristic mud samples taken from the reservoir Sulejów in the area of the intake of drinking water for the town of Łódź. Rheological research was conducted using a rotational viscometer Rheotest 2, Couette-Searle type. The limit volumetric concentrations of the two muds were found to be 1.4 and 1.8%, respectively. Using the relationships established by Migniot, the volumetric concentrations corresponding with the transition from easy erosion to hard erosion were calculated. Sedimentation studies provided a basis for estimating the characteristic times of mud settlement. Finally, the average critical flow velocities, enabling the erosion of the top layer of mud to begin, were determined and were found to be 1.16 and 1.37 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. As the mean discharge of the water intake is 2 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, the water flow to the intake has the average velocity of 0.0154 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, which value is about 80 times smaller than the mean velocity causing mud erosion. Therefore, already after 2–3 days of settling, the cohesive mud deposited in the water intake area will not be eroded by the water stream flowing to the intake.

Key words: rheology, sedimentation, mud settlement, hydraulic erosion

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 11.10.2006