

WYKORZYSTANIE BADAŃ LABORATORYJNYCH ROZMYĆ PONIŻEJ BUDOWLI WODNYCH DO OCENY ICH BEZPIECZEŃSTWA

Sławomir Bajkowski, Piotr Siwicki, Janusz Urbański

Streszczenie: W artykule opisano kryteria oceny zagrożenia budowli wodnych rozmyciem dna stanowiska dolnego. Opisano sposób określania granicznego nachylenia krytycznej prostej bezpieczeństwa, według kryterium stateczności zastępczej i zakresu aktywnej strefy naprężeń. Przedstawiono zmienność wartości współczynników nachylenia prostej krytycznej, uzyskanych w badaniach doświadczalnych, na tle wartości teoretycznych.

Słowa kluczowe: rozmycia poniżej budowli wodnych, bezpieczeństwo budowli wodnych

WSTĘP

Badania powstającego w dolnym stanowisku budowli wyboju mają praktyczne zastosowanie w ich projektowaniu i ocenie bezpieczeństwa. Zgodnie z Rozporządzeniem [1996] stateczność budowli wodnych oblicza się według metody stanów granicznych nośności i użytkowania. Dla prostych układów obliczeniowych przyjmuje się poziome dno nie rozmytego koryta, a powstający poniżej budowli wodnych wybój nie ma jednoznacznego przełożenia na przyjmowane schematy. Obliczając warunki stateczności ogólnej, przyjmuje się możliwość utraty stateczności budowli wraz z bryłą gruntu wzdłuż kołowej linii poślizgu dla poziomego jednostronnie odciążonego podłoża lub dla stoku, za który można uznać skarpe pobliskiego wyboju [Biernatowski i in. 1987]. Na stateczność budowli wpływają przede wszystkim takie cechy tworzącego się wyboju, jak: głębokość maksymalna (h_{max}), odległość wystąpienia największego rozmycia od końca wypadu (L_{min}), kąt nachylenia powierzchni stoku wyboju (α). Inne parametry powstającego dołu rozmycia, wpływające na bezpieczeństwo budowli, np. głębokość odsłonięcia fundamentu (h_s), nie są w pracy analizowane.

Celem artykułu było określenie kryteriów wyboru współczynnika nachylenia krytycznej prostej bezpieczeństwa budowli wodnych i wielkości mających wpływ na jego

wartość oraz analiza możliwości wykorzystania wyników doświadczalnych badań rozmyć stanowiska dolnego budowli wodnych do oceny zagrożenia ich stateczności powstającym poniżej wybojem. Wykorzystano wyniki badań modelowych własnych oraz innych autorów, zaczerpnięte z literatury.

BEZPIECZEŃSTWO BUDOWLI WODNYCH

Budowle wodne ulegając awarii, stwarzają zagrożenie dla istnień ludzkich, zniszczenia mienia oraz degradacji środowiska przyrodniczego. Ważnym elementem w ocenie bezpieczeństwa budowli jest poznanie i analiza przyczyn dotychczasowych awarii. Ewidencja awarii prowadzona jest dla dużych budowli; dla małych obiektów brak jest takich danych, ponieważ ich katastrofy nie są tak groźne w skutkach, obejmują małe obszary, a ich znaczenie gospodarcze jest niewielkie. Z powodu braku stosownych informacji trudno jest podać główne przyczyny katastrof tych obiektów. Pierwszym krokiem w zapobieganiu awariom jest prawidłowa analiza potencjalnych zagrożeń i uwzględnienie ich na etapie obliczeń projektowych. W ocenie bezpieczeństwa za główne funkcje budowli wodnych uznaje się przenoszenie obciążeń oraz trwanie w stanie równowagi [Lewandowski 1993], o którym świadczą spełnione warunki stateczności. Budowle wodne podlegają działaniu czynników i warunków środowiska, które różnicuje się w zależności od okresów i sposobu eksploatacji obiektu. Wyróżnia się trzy charakterystyczne okresy w funkcjonowaniu obiektów: budowę, normalną eksploatację i sytuacje wyjątkowe.

Na każdym etapie skutki katastrofy mogą być bardzo zróżnicowane w zależności od natężenia i czasu działania czynnika destrukcyjnego oraz rodzaju i wielkości samej budowli. Rozporządzenie [1996] różnicuje budowle wodne pod względem ich „ważności”, dzieląc je na 4 klasy, w zależności od których ustala się wskaźniki bezpieczeństwa. Trwałość obiektów związana jest z „jakością” budowli, wynikającą z konstrukcji i wykonania, ocenianą przy odbiorze obiektu oraz „niezawodnością” w ujęciu czasowym. Bezpieczeństwo budowli ulega zmianie w czasie jej eksploatacji, co jest powodowane zmianami wartości parametrów, które decydują o zachowaniu stateczności obiektu. W użytkowaniu budowli wyróżnia się trzy fazy zagrożenia awarią:

- faza pierwsza, o dużym prawdopodobieństwie zaistnienia zdarzenia, odpowiadająca początkowemu okresowi eksploatacji budowli,
- faza druga, ustabilizowania się warunków zagrożenia,
- faza trzecia, zwiększonego ryzyka awarii w wyniku „starzenia” się budowli.

Budowle wodne powinny przenosić wszystkie obciążenia zmieniające się w czasie jej użytkowania. Nie zawsze jednak zmianie obliczeniowych układów i wielkości obciążeń towarzyszy całkowita utrata zdolności projektowych obiektu. Lewandowski [1993] różnicuje pojęcie „uszkodzenia” jako zachowania oddziałującego na proces eksploatacji, wyrażającego się niespełnieniem wymagań projektowych od „zniszczenia”, czyli efektu utraty zdolności obiektu, co utożsamiane jest z „awarią”. Uwzględniając czasowy oraz eksploatacyjny parametr działania obciążeń, norma PN-82/B-02000 dzieli je na: stałe, zmienne w całości długotrwałe, zmienne w części długotrwa-

łe, zmienne w całości krótkotrwałe oraz wyjątkowe. Wprowadzenie takiej klasyfikacji pozwala na konfigurowanie obciążeń stosownie do okresu i warunków eksploatacji. W budowlach hydrotechnicznych w ustalaniu obciążeń duże znaczenie mają sytuacje wyjątkowe, wynikające z występowania falowania lustra wody lub użytkowania wody, np. uderzenie taboru pływającego.

Odpowiednio do stanu konstrukcji układ jej obciążeń dobiera się dla okresu budowy, eksploatacji i sytuacji wyjątkowych. Tak zróżnicowane układy obliczeniowe pozwalają ocenić bezpieczeństwo budowli w różnych okresach jej funkcjonowania oraz dobrać najbardziej niekorzystne warunki obliczeniowe. Trudno jest jednak ocenić zwiększające się ryzyko awarii budowli w zależności od postępującego procesu „starzenia” się obiektu lub zaistnienia czynników losowych, powodujących nieprzewidywalny wzrost oddziaływań ponad wartości przyjmowane do obliczeń stateczności. Wymagane jest również rozpoznanie i oszacowanie wpływu samego obiektu na czasową zmianę układu obciążeń, np. na rozmycie dolnego stanowiska w okresie eksploatacji. Powstający wybój nie powinien być pomijany w ocenie bezpieczeństwa obiektu. Ważne staje się prognozowanie jego rozwoju na różnych etapach użytkowania obiektu. W początkach okresu eksploatacyjnego prawdopodobieństwo awarii budowli spowodowane powstającym wybojem jest niewielkie, ale z upływem czasu znacznie wzrasta. Końcowa faza kształtowania się rozmycia ma niekorzystny wpływ na parametry hydrauliczne strumienia w stanowisku dolnym i w urządzeniach do rozpraszania energii. Prowadzi to do zwiększenia intensywności procesu rozmycia, co zwiększa możliwość awarii.

Powstające w stanowisku dolnym rozmycia rozpoznawane są poprzez badania laboratoryjne i pomiary terenowe. Modele laboratoryjne są na stałe łączone ze stanowiskami badawczymi, przez co nie są odwzorowywane rzeczywiste obciążenia działające stabilizująco i destabilizująco na budowlę. Określanie wpływu powstającego wyboju na stan równowagi budowli wymaga modelowania nie tylko samej budowli, ale również oddziaływań gruntu podłoża i nasypów ograniczających przepływ wody wokół budowli.

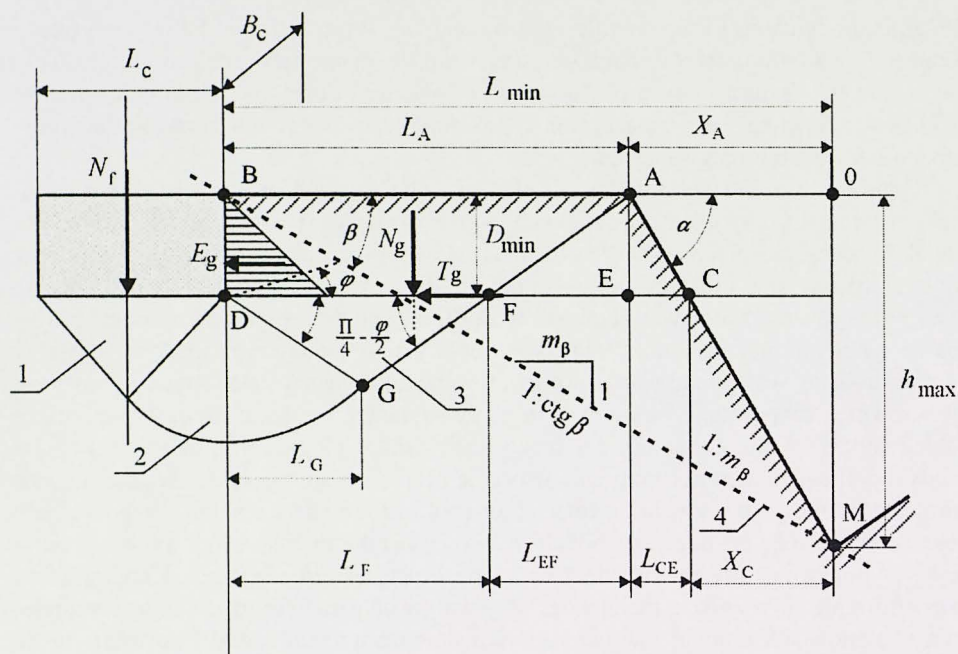
KRYTERIA WYZNACZANIA GRANICZNEGO NACHYLENIA

Według Dąbkowskiego i innych [1982], za miarę zagrożenia budowli można przyjąć nachylenie fikcyjnej prostej przechodzącej przez koniec wypadu i dół rozmycia w jego maksymalnej głębokości. Interpretując nachylenie tej prostej jako stosunek $l : m_{\beta}$, wartość współczynnika nachylenia m_{β} równa jest $\operatorname{ctg} \beta = L_{\min} : h_{\max}$ (rys. 1).

Graniczne nachylenie prostej proponuje się określić według następujących warunków:

- stateczności zastępczej,
- zakresu aktywnej strefy podłoża gruntowego,
- wyparcia gruntu podłoża,
- stateczności ogólnej.

W analizie wykorzystano dwa pierwsze kryteria. Wartość $\operatorname{ctg} \beta$, określoną według pierwszego warunku, zdefiniowano dolną graniczną wartością nachylenia prostej krytycznej ($\operatorname{ctg} \beta_d$), a według kryterium drugiego – górną ($\operatorname{ctg} \beta_g$).



Rys. 1. Schemat obliczeniowy: 1 – klin gruntowy, 2 – obszar przejściowy, 3 – obszar wypierania, 4 – prosta krytyczna

Fig. 1. Definition scheme: 1 – soil wedge, 2 – transition region, 3 – immersion region, 4 – critical line

Tworzący się w dolnym stanowisku wybój w pierwszej kolejności zagraża trwałości dolnych umocnień elastycznych i sztywnych. Do oceny zagrożenia sztywnych elementów umocnień dolnych wprowadzono analogiczny parametr jak dla fundamentu budowli, oznaczając go $\text{ctg}\beta_w$. Po zniszczeniu umocnień dolnych następuje szybki rozwój procesu rozmycia powodujący przesuwanie się wyboju w kierunku jazu oraz odsłanianie fundamentów budowli od strony wody dolnej. Przewidując zniszczenie umocnień dolnych jazu w czasie jego eksploatacji, już na etapie projektowania wymagane jest sprawdzenie stateczności fundamentu z uwzględnieniem prognozowanej lokalizacji skarpy wyboju, powstałej po zniszczeniu umocnień.

Z wielkości geometrycznych fundamentu w analizach uwzględniono:

D_{\min} – minimalną głębokość posadowienia fundamentu,

L_c – całkowitą długość podstawy fundamentu lub części poszuru przylegającej do wyboju,

B_c – całkowitą szerokość podstawy fundamentu.

W obliczeniach przyjęto jednorodny niespoisty grunt podłoża ($c = 0$) o kącie tarcia wewnętrznego φ oraz ciężarze objętościowym γ . Obciążenie od fundamentu działa pionowo, bez mimośrod. Ścianę dolną fundamentu założono pionową, a dno w stanowisku dolnym na odcinku od fundamentu do krawędzi wyboju – poziome.

KRYTERIUM STATECZNOŚCI ZASTĘPCZEJ

Dolną graniczną wartość współczynnika nachylenia prostej krytycznej ($\text{ctg}\beta_d$) określono w układzie obciążeń do sprawdzenia stanu stateczności zastępczej na przesunięcie budowli w płaszczyźnie jej posadowienia. Obciążeniem działającym od strony wyboju jest graniczny odpór gruntu, należący do grupy obciążeń stabilizujących, polepszających warunki stateczności. W warunkach tworzącego się wyboju poniżej budowli, a szczególnie przy jego przemieszczaniu się w kierunku fundamentu nie można wykluczyć przesunięcia się budowli razem z gruntem zalegającym do poziomu posadowienia od strony wyboju. Zjawisko to będzie miało miejsce, gdy obliczony odpór gruntu (E_g) przekroczy siłę tarcia (T_g), powstające na poziomie posadowienia fundamentu w przestrzeni między ścianą fundamentu a skarpią wyboju. Graniczne nachylenie teoretycznej prostej obliczono z warunku $E_g = T_g$. Inne obciążenia oraz tarcie gruntu w płaszczyznach bocznych styku budowli z gruntem nie zależą bezpośrednio od parametrów i miejsca powstawania wyboju.

Wartość odporu gruntu (E_g) zalegającego do poziomu D_{\min} (rys. 1) określa wzór:

$$E_g = \frac{1}{2} \gamma \cdot D_{\min}^2 \cdot B_c \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1)$$

Siłę przeciwdziałającą, przesunięciu masy gruntu zalegającego do poziomu fundamentu (T_g) równą iloczynowi pionowej siły obciążenia gruntem (N_g) i współczynnika tarcia gruntu ($f = \text{tg}\varphi$) obliczono z zależności:

$$T_g = f \cdot \gamma \cdot B_c \cdot D_{\min} \left[h_{\max} (\text{ctg}\beta - \text{ctg}\alpha) + \frac{1}{2} D_{\min} \cdot \text{ctg}\alpha \right] \quad (2)$$

Porównując prawe strony równań (1) i (2) oraz wprowadzając współczynnik głębokości posadowienia budowli $n = h_{\max} / D_{\min}$, otrzymano:

$$\text{ctg}\beta_d = \frac{1}{2f \cdot n} \text{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + \text{ctg}\alpha \cdot \left(1 - \frac{1}{2n} \right) \quad (3)$$

Przy stałej głębokości wyboju zwiększający się kąt α pozwala na uzyskanie większego nachylenia prostej krytycznej. Wartość kąta stoku naturalnego nie ma znaczącego bezpośredniego wpływu na wartość współczynnika $\text{ctg}\beta_d$, pośrednio wpływ ten występuje poprzez relację z kątem nachylenia stoku wyboju.

KRYTERIUM ZASIĘGU AKTYWNEJ STREFY PODŁOŻA GRUNTOWEGO

Górną graniczną wartość współczynnika nachylenia prostej krytycznej ($\text{ctg}\beta_g$) określono z kryterium wpływu skarpy wyboju na zmianę warunków obliczania stanu granicznego naprężeń. Za stan pełnego bezpieczeństwa budowli przyjęto położenie wyboju poza strefą wpływu fundamentu wywołującego w podłożu stan naprężeń. W granicznym układzie skarpy wyboju zaczyna się na granicy aktywnej strefy podłoża gruntowego (rys. 1).

Zakres aktywnej strefy wpływu fundamentu na poziomie posadowienia (L_F – rys. 1) określono według Motaka [1988]. Uwzględniając szerokość L_{EF} klina gruntu o głębokości D_{min} oraz szerokość skarpy wyboju X_A , odległość miejsca największego rozmycia L_{min} od końca fundamentu oblicza się ze wzoru:

$$L_{min} = L_F + L_{EF} + X_A = L_c \frac{\cos\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}{\cos\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)} \exp\left(\frac{\Pi}{2} \operatorname{tg}\varphi\right) + \frac{D_{min}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} + \frac{h_{max}}{\operatorname{tg}\alpha} \quad (4)$$

Położenie miejsca największego rozmycia od brzegu fundamentu z wykorzystaniem współczynnika nachylenia $\operatorname{ctg}\beta$ określa wzór:

$$L_{min} = \operatorname{ctg}\beta \cdot h_{max} \quad (5)$$

Porównując prawe strony równań (4) i (5), otrzymuje się:

$$\operatorname{ctg}\beta_g = \frac{p}{n} \frac{\cos\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}{\cos\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)} \exp\left(\frac{\Pi}{2} \cdot \operatorname{tg}\varphi\right) + \frac{1}{n} \frac{1}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} + \operatorname{ctg}\alpha \quad (6)$$

gdzie: $p = \frac{L_c}{D_{min}} = \frac{n}{s}$ – współczynnik długości podstawy fundamentu budowli,

$n = \frac{h_{max}}{D_{min}}$ – współczynnik głębokości posadowienia,

$s = \frac{h_{max}}{L_c}$ – współczynnik głębokości dołu rozmycia.

Na wartość $\operatorname{ctg}\beta_g$ znaczący wpływ ma współczynnik p oraz kąt tarcia wewnętrznego gruntu, tak jak zależy od tego kąta zakres aktywnej strefy naprężeń; bezpośredni wpływ kąta nachylenia stoku wyboju jest niewielki.

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Badania rozmyć poniżej budowli wodnych prowadzono niemal we wszystkich liczących się laboratoriach na całym świecie. Często jednak autorzy publikują wybrane wyniki pomiarów, np. maksymalne głębokości rozmycia, co nie pozwala na określenie wartości współczynnika m_β . W artykule zamieszczono wyniki z tych prac, według których możliwe było określenie zarówno wartości h_{max} , jak i L_{min} , ograniczając się do badań budowli nisko- i średniospadowych.

Parametry lub cechy, których wpływ na rozmycie dolnego stanowiska były uwzględniane w badaniach doświadczalnych, to:

- czas trwania procesu rozmycia,

- natężenie przepływu kształtującego rozmycie,
- warunki zatopienia odskoku powstającego na długości wypadu,
- głębokość wody dolnej,
- sposób przeprowadzenia wody przez urządzenia przelewowe,
- udział różnego rodzaju urządzeń upustowych w przeprowadzaniu wód,
- rozwiązania konstrukcyjne urządzeń do rozpraszania energii,
- warunki wprowadzenia strumienia z wypadu w dolne stanowisko.

Wyniki jednego autora, obejmujące wspólne cechy badawcze, zebrano w serie pomiarowe. Część wyników zaczerpnięto z badań doświadczalnych prowadzonych na fizycznych modelach obiektów, inne z badań ogólnych prowadzonych w celu poznania zjawiska i określenia wpływu na jego rozwój parametrów hydraulicznych strumienia, czasu lub cech rumowiska. Badania nad rozpoznaniem zjawiska nazwano podstawowymi, a prowadzone na modelach fizycznych budowli – modelowymi. Dla obiektów ze sztywnymi umocnieniami dolnymi, długości L_s , dodatkowo obliczano współczynnik nachylenia $ctg\beta u = Lu_{\min}/h_{\max}$, przyjmując za $Lu_{\min} = L_{\min} - L_s$. Minimalne zagłębienie umocnień (Du_{\min}) przyjęto równe długości elementu kończącego umocnienia, a przy jego braku równe grubości płyty. Przyjęte w analizach oznaczenia serii, obliczane współczynniki oraz rodzaj badań i zmieniane w ich trakcie wielkości zestawiono w tabeli 1.

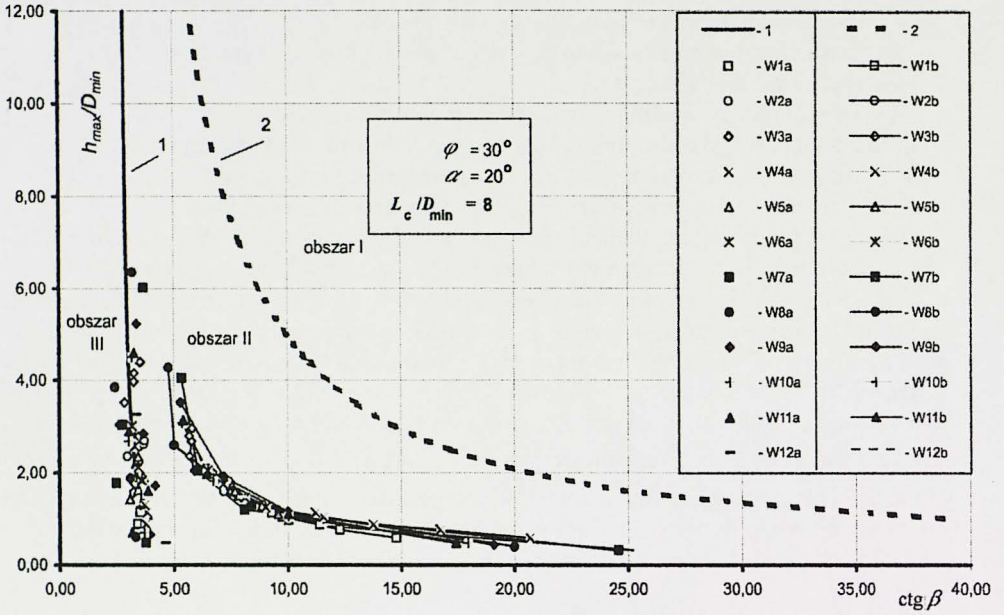
Tabela 1. Warunki wykonywania badań

Table 1. Conditions of study

Lp. No	Źródło danych Date source	Serie Series	Obliczany współczynnik Calculated coefficient	Typ badań Type of study	Czynnik zmienny Variable factor
1	Badania własne	W1a, W1b W2a, W2b W3a, W3b	$ctg\beta u, ctg\beta$	M*, 1 : 30	czas trwania badania, przepływ
2		W4a, W4b W5a, W5b W6a, W6b	$ctg\beta u, ctg\beta$	M, 1 : 55	czas trwania badania, przepływ
3		W7a, W7b W8a, W8b W9a, W9b	$ctg\beta u, ctg\beta$	M, 1 : 30	średnica materiału dennego, przepływ
4		W10a, W10b W11a, W11b W12a, W12b	$ctg\beta u, ctg\beta$	M, 1 : 55	średnica materiału dennego, przepływ
5	Karpov (1966)	Ka1b	$ctg\beta$	P**	zatopienie odskoku
6	Koyro (1968)	Ko1b	$ctg\beta$	P	średnica materiału dennego rozdział przepływu
7	Levi (1955)	Le1b Le2b	$ctg\beta$ $ctg\beta$	P	czas trwania badania, długość wypadu
8	Łanturiev (1955)	Ła1b Ła2b	$ctg\beta$ $ctg\beta$	P M, 1 : 35	średnica materiału dennego, konstrukcja wypadu
9	Matwiejev (1960)	Ma1b, Ma2b	$ctg\beta$	P	czas trwania badania
10	Badania modelowe...	Lu1a, Lu1b Lu2a, Lu2b	$ctg\beta u, ctg\beta$	M, 1 : 20	konstrukcja wypadu
11	Studenicznikov (1964)	St1b	$ctg\beta$	P	średnia materiału dennego
12	Surova (1957)	Su1b	$ctg\beta$	P	poziom wody dolnej

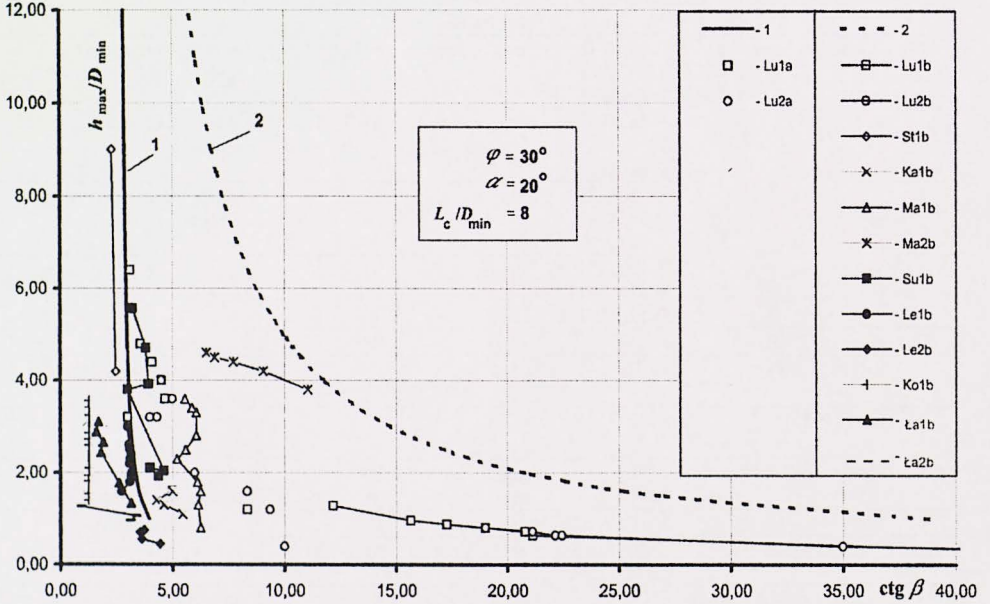
*M – badania modelowe.

**P – badania podstawowe.



Rys. 2. Współczynniki nachylenia krytycznej prostej według badań własnych: 1 – krzywa $ctg\beta_d$, 2 – krzywa $ctg\beta_g$

Fig. 2. Slope coefficients of critical line after own investigations: 1 – line $ctg\beta_d$, 2 – line $ctg\beta_g$



Rys. 3. Współczynniki nachylenia krytycznej prostej według innych autorów: 1 – krzywa $ctg\beta_d$, 2 – krzywa $ctg\beta_g$

Fig. 3. Slope coefficients of critical line after other authors: 1 – line $ctg\beta_d$, 2 – line $ctg\beta_g$

Wartości graniczne współczynnika $\text{ctg}\beta$ obliczone ze wzorów (3) i (6) dla $\varphi = 30^\circ$, $\alpha = 20^\circ$, $p = 8$ i n z zakresu od 1,0 do 12 przedstawiono na wykresach, na których naniesiono wartości współczynnika $\text{ctg}\beta$ uzyskane z pomiarów własnych (rys. 2) oraz innych autorów (rys. 3). Wartości $\text{ctg}\beta_d$ (linia 1) oraz $\text{ctg}\beta_g$ (linia 2) przedstawiają położenie miejsca najgłębszego rozmycia względem końca wypadu lub końca umocnień. Dzielią one pola wykresów na trzy charakterystyczne strefy:

- obszar I, po prawej stronie linii 2, wyznacza położenie wyboju, poza strefą wpływu fundamentu,
- obszar II, między liniami 2 i 3, określa stan zmiennego bezpieczeństwa, wskazujący na możliwość powstania zagrożenia budowli rozwijającym się poniżej wybojem,
- obszar III, po lewej stronie linii 1, wskazuje na występowanie stanu zagrożenia budowli wybojem tworzącym się w jej dolnym stanowisku.

W każdym z badanych przypadków wybój powstawał w zakresie aktywnej strefy podłoża gruntowego. Dla większości badanych przypadków obliczone wartości współczynników nachylenia układają się z lewej strony obszaru II oraz z prawej strony obszaru III. Tylko dla badań Matwiejewa i Michajłowa [1960], prowadzonych z dozowaniem rumowiska, laboratoryjne wartości współczynnika nachylenia przybliżają się do krzywej granicznej górnej (punkty serii Ma2b na rysunku 3).

Współczynniki nachylenia według badań własnych układają się w dwie grupy obejmujące oddzielnie wartości dla fundamentu i dla umocnień. Wartości dla umocnień położone są wokół dolnej krzywej granicznej i kwalifikują powstałe rozmycia do zagrażających trwałości elementów umocnień. Gdyby tak duże rozmycia powstały w naturze, umocnienia uległyby uszkodzeniu, a nawet zniszczeniu. W celu zmniejszenia zagrożenia wymagane jest zastosowanie na końcu umocnień wgłębnego elementu podpierającego. Fundament budowli znajduje się w stanie zagrożenia tylko dla dużych przepływów lub drobnych gruntów w podłożu. W pozostałych sytuacjach występują duże wartości współczynnika nachylenia, kwalifikujące warunki do kategorii bezpiecznych.

Duże zagrożenie budowli stwarzają rozmycia strumieniem spadającym bezpośrednio na dno. W obszarze III znalazły się wyniki badań Studenicznikova [1964] (strumień spadający z niskiej odskoczni hydraulicznej) oraz Łanturiewa [1955] prowadzone dla obiektu z wypadem płaskim, zakończonym progiem lub rozdzielaczami strug w kształcie odskoczni. Wokół linii granicznej I układają się wyniki Surovej [1957] i Leviego [1955] (wypadki bez urządzeń do rozpraszania energii), odpowiadające stanowi dostatecznego bezpieczeństwa. Stosunkowo niewielkie rozmycia uzyskali Matwiejev i Michajłow [1960] dla budowli o szerokim progu. W badanym modelu jazu Lutomiarsk [Badania modelowe...1976] rozmycia w stanowisku dolnym przyjęto za jedno z kryteriów doboru konstrukcji wypadu. Ostatecznie wybrano wariant gwarantujący na etapie projektowania bezpieczeństwo fundamentu oraz płyt umocnienia dolnego (wartości $\text{ctg}\beta$ większe od 20). Zaproponowana po wykonaniu badań modelowych nowa konstrukcja wypadu miała płytszą nieckę wypadową oraz inne wymiary i układ szykan niż pierwotny wariant projektowy.

WNIOSKI I SPOSTRZEŻENIA

Przeprowadzone analizy wykazały, że współczynnik nachylenia krytycznej prostej:

- nie jest wartością stałą, a należy go określać indywidualnie dla poszczególnych obiektów,

- należy dobierać według kryterium stateczności zastępczej na przesunięcie w poziomie posadowienia oraz zakresu efektywnej strefy naprężeń,

- jest wielkością zależną od parametrów gruntu podłoża oraz wymiarów fundamentu i głębokości posadowienia,

- uzyskany z badań doświadczalnych prowadzonych z dozowaniem rumowiska wykazuje znacznie większe wartości niż bez uzupełniania materiału.

Powstające w dolnym stanowisku rozmycia stwarzają duże zagrożenie dla stateczności płyt umocnienia dolnego, pozostawiając konstrukcję fundamentu bezpieczną. Potwierdzają to pomiary terenowe wykonane dla wybranych jazów na rzece Narwi [Dąbkowski i in. 1992], gdzie w wyniku powstających rozmyć zniszczeniu uległy umocnienia elastyczne i w części sztywne, a konstrukcja jazu pozostawała stateczna. Nie wykluczało to jednak konieczności przedsięwzięcia prac zmierzających do ograniczenia dalszego powiększania się wyboju.

Ocenę zagrożenia budowli wybojem należałoby prowadzić na podstawie pomiarów terenowych, gdyż badania doświadczalne nie dają pełnego obrazu tych zagrożeń.

PIŚMIENNICTWO

- Badania modelowe jazu Lutomiersk na rzece Ner, 1976. Maszynopis. Instytut Budownictwa Melioracyjnego i Rolnego SGGW, Warszawa,
- Biernatowski K. i inni, 1987. Fundamentowanie. Projektowanie i wykonawstwo. Podłoże budowlane. Arkady, Warszawa.
- Dąbkowski L.Sz., Bajkowski S., Hajkiewicz J., 1992. Rozmycia dna koryta Narwi poniżej jazów. Gospodarka Wodna, 8, 188–191.
- Dąbkowski L.Sz., Skibiński J., Żbikowski A., 1982. Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych. PWRiL, Warszawa.
- Karpov A.I., 1966. Issledovanije vlijanija stepieni zatopenija pryżka na formirovanije voronok miestnych razmyvov pri donnom režimie sopriażnienija biefov. Gidravlika i Gidrotehnika, 3, 83–87.
- Koyro E., 1968. Die kolkbildung hinter kombiniert über-und unterströmten wehren. Von der Fakultät für Bauwesen der Technischen Hochschule Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig zur Erlangung der Würde eines.
- Lewandowski B.J., 1993. Bezpieczeństwo budowli hydrotechnicznych po wieloletnim okresie eksploatacji na przykładzie stopnia wodnego Dychów. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu 20, Poznań.
- Lewandowski B., Jakowlew G., 1986. Rozmycia lokalne w warunkach oddziaływania przepływu filtracyjnego. Gospodarka Wodna 12, 277–278.
- Levi I.I., 1955. Dviženije rečnych potokov v nižnich biefach gidrotechničeskich sooruzenij. Gosudarstviennoje Energetičeskoje Izdatielstvo, Moskwa – Leningrad.
- Lanturiev N.V., 1955. O miestnom razmyvje nižnevo biefu. Gidrotechničeskoje Stroitelstvo, 6, 37–40.

- Matwiejev K.V., Michajłowa N.A., 1960. Issledowanije miestnych deformacii rusla v nižnem bieffie. Voprosy Inženiernoj Gidravliki. Tranżeldorizdat, Moskwa.
- Motak E., 1988. Fundamenty bezpośrednio. Arkady, Warszawa.
- Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 20 grudnia 1996 r. W sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane gospodarki wodnej i ich usytuowanie. DzU z dnia 5 marca 1997 r. nr 21, poz.111.
- Studenicznikov B.I., 1964. Razmywajuščā sposobnost potoka i metody ruslowych rasčetov. Izdatelstvo Literatury po Stroitelstvu, Moskwa.
- Surova N.N., 1957. K voprosu o miestnom pazmyvie za gorizontalnym krepleniem nižnowo biefa. Gidrotechničeskoje Stroitelstvo 2, 40–41.

UTILIZATION OF LABORATORY INVESTIGATIONS OF LOCAL SCOUR BELOW WATER STRUCTURES TO ESTIMATE THEIR SAFETY

Abstract: In the article authors characterized the slope coefficient of critical line of the scour below hydraulic structures. The slope of the scour hole is of importance for the stability of adjacent structures and bad protection. Most of the authors carried on study of scour below a spillway and sluice gate. The own and other authors model test results made of two-dimensional flow are presented. Some of the results from study are shown on figure 2 and 3.

Key words: local scour below water structures, safety of water structures

S. Bajkowski, P. Siwicki, J. Urbański, Zakład Inżynierii Wodnej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa