INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND EKOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 4/2/2007, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 7–14
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Sławomir Bajkowski

PROSTE KRYTERIA OCENY BEZPIECZEŃSTWA JAZÓW NA RZEKACH NIZINNYCH

SIMPLE CRITERIA OF ESTIMATING THE LOWLAND WEIRS SAFETY

Streszczenie

W artykule opisano wykorzystanie nachylenia krytycznej prostej bezpieczeństwa do oceny stanu zagrożenia budowli piętrzących wybojem powstającym w ich dolnych stanowiskach. Wartości granicznych nachyleń krytycznej prostej bezpieczeństwa określono według warunku stateczności zastępczej. Pomiary terenowe wykonywane były w zmieniających się warunkach hydrologicznych, hydraulicznych i eksploatacyjnych, dlatego też analizowano tylko czasową zmienną niezależną. Porównując nachylenia prostych obliczone z pomiarów terenowych z teoretycznymi wartościami granicznymi, określono stan zagrożenia analizowanych obiektów na różnych etapach ich eksploatacji.

Słowa kluczowe: budowle wodne, rozmycie, bezpieczeństwo

Summary

In the article Author characterized the calculating conditions of boundary slope coefficient of critical scour line below hydraulic structures, used to estimation of the buildings safety. Boundary values of these coefficients were computed for two schemes: equivalent stability, range active tensions zone. The field studies were made for different hydrological, hydraulic and exploiting conditions, so the time was the only independent factor. Computed coefficients of critical line and some of the result of field study are compared. The safety states of analysed objects in different stages of their exploitation were defined after the comparison of real coefficients witch took of field measurements with counted values.

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

WSTĘP

Budowle wodne powinny być utrzymywane w takim stanie, aby mogły pełnić swoje główne funkcje, za które w dziedzinie bezpieczeństwa uznaje się przenoszenie obciążeń oraz trwanie w stanie równowagi. Rozmycie dolnego stanowiska jest jednym z wielu zagrożeń obiektów hydrotechnicznych, dlatego też wyniki badań powstającego w dolnym stanowisku budowli wyboju mają praktyczne zastosowanie. Rozpoznaje się je poprzez badania laboratoryjne i pomiary terenowe. W pracy Bajkowski i inni [2002] autorzy wykazali, że większość prowadzonych badań doświadczalnych nie pozwala na modelowanie rzeczywistych obciążeń działających na budowlę, dlatego też ich wyników nie można bezpośrednio wykorzystywać do prognozowania bezpieczeństwa budowli wodnych. Niniejszy artykuł jest rozwinięciem wniosku sformułowanego w pracy Bajkowski i inni [2002] wskazującego na dużą rolę wyników badań terenowych w ocenie zagrożeń budowli wodnych tworzącym się wybojem. Zawarte w nim analizy są uzupełnione o kolejne kryterium obliczania granicznego współczynnika nachylenia prostej bezpieczeństwa (wyparcia gruntu z podłoża) oraz wykorzystują wyniki pomiarów terenowych do zdefiniowania rzeczywistego zagrożenia badanych budowli w kolejnych latach ich eksploatacji. Pomiary terenowe dają pogląd na rzeczywiste rozmiary deformacji koryta poniżej budowli w czasie ich eksploatacji, na tle zmieniających się warunków hydrologicznych i hydraulicznych.

W ocenie stateczności budowli analizowano następujące cechy tworzącego się wyboju: głębokość maksymalną h_{max}, odległość wystąpienia największego rozmycia od końca wypadu L_{min}, kąt nachylenia stoku wyboju α. Nie mniej ważnymi wielkościami mającymi wpływ na zachowanie stateczności obiektu są: głębokość odsłonięcia fundamentu, szerokość obszaru rozmycia oraz powstające w obszarze poniżej urządzeń do rozpraszania energii znaczne rozluźnienie gruntu spowodowane strumieniem filtrującej pod obiektem wody.

Celem artykułu jest przedstawienie wybranych kryteriów doboru granicznych wartości współczynników nachyleń krytycznej prostej bezpieczeństwa oraz zaprezentowanie zmian stanu zagrożenia budowli piętrzących w początkowym okresie ich eksploatacji i po przeprowadzonych remontach.

KRYTERIA WYZNACZANIA GRANICZNEGO WSPÓŁCZYNNIKA NACHYLENIA

Do oceny stopnia zagrożenia fundamentu budowli przyjęto współczynnik nachylenia krytycznej prostej zagrożenia łączącej górny skrajny koniec fundamentu z miejscem największego rozmycia. Nachylenie tej prostej wyrażono stosunkiem $1{:}m_\beta$, w którym współczynnik m_β równy jest $\mathrm{ctg}\beta = L_{min}/h_{max}$.

Wartość graniczna współczynnika ctgβ określono według kryterium wyparcia gruntu podłoża spod fundamentu budowli.

Warunki równowagi fundamentu liczono dla jednorodnego niespoistego gruntu podłoża o kącie tarcia wewnętrznego φ, ciężarze objętościowym γ oraz dla wielkości geometrycznych fundamentu: $D_{\min}$ – minimalnej głębokości posadowienia, L_c – całkowitej długości podstawy, B_c – całkowitej szerokości podstawy. W analizach przyjęto, że ściana fundamentu jest pionowa a dno rzeki poziome.

Kryterium dolne określono, porównując odpór graniczny gruntu niespoistego E_g zalegającego do poziomu $D_{\min}$ z siłą tarcia T_g działającą w poziomie posadowienia na szerokości fundamentu B_c, równą iloczynowi obciążenia gruntem N_g oraz współczynnika tarcia $f = \mathrm{tg}\varphi$. Wprowadzając współczynnik głębokości posadowienia budowli $n = h_{\max} / D_{\min}$, otrzymano zależność:

$$\mathrm{ctg}\beta_d = \frac{1}{2f\,n}\mathrm{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + \mathrm{ctg}\alpha\left(1 - \frac{1}{2n}\right) \tag{1}$$

Kryterium górne uzyskano, porównując odległość miejsca największego rozmycia $L_{\max}$ od końca fundamentu będącą sumą długości zakresu aktywnej strefy wpływu fundamentu na poziomie posadowienia, szerokości klina gruntu o głębokości $D_{\min}$ i skarpy wyboju X_A, z tą samą odległością obliczoną z wykorzystaniem współczynnika nachylenia ctgβ, uzyskując wzór:

$$\mathrm{ctg}\beta_g = \frac{p}{n}\frac{\cos\xi_P}{\cos\xi_L}\exp\left(\frac{\Pi}{2}\mathrm{tg}\varphi\right) + \frac{1}{n}\frac{1}{\mathrm{tg}\xi_P} + \mathrm{ctg}\alpha \tag{2}$$

gdzie:

$p = \dfrac{L_c}{D_{\min}} = \dfrac{n}{s}$ – współczynnik długości podstawy fundamentu,

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

$s = \dfrac{h_{\max}}{L_c}$ – współczynnik głębokości dołu rozmycia,

$\xi_L = \left(\dfrac{\Pi}{4} + \dfrac{\varphi}{2}\right)$, $\xi_P = \left(\dfrac{\Pi}{4} - \dfrac{\varphi}{2}\right)$ – kąty nachylenia lewej i prawej płaszczyzn poślizgu.

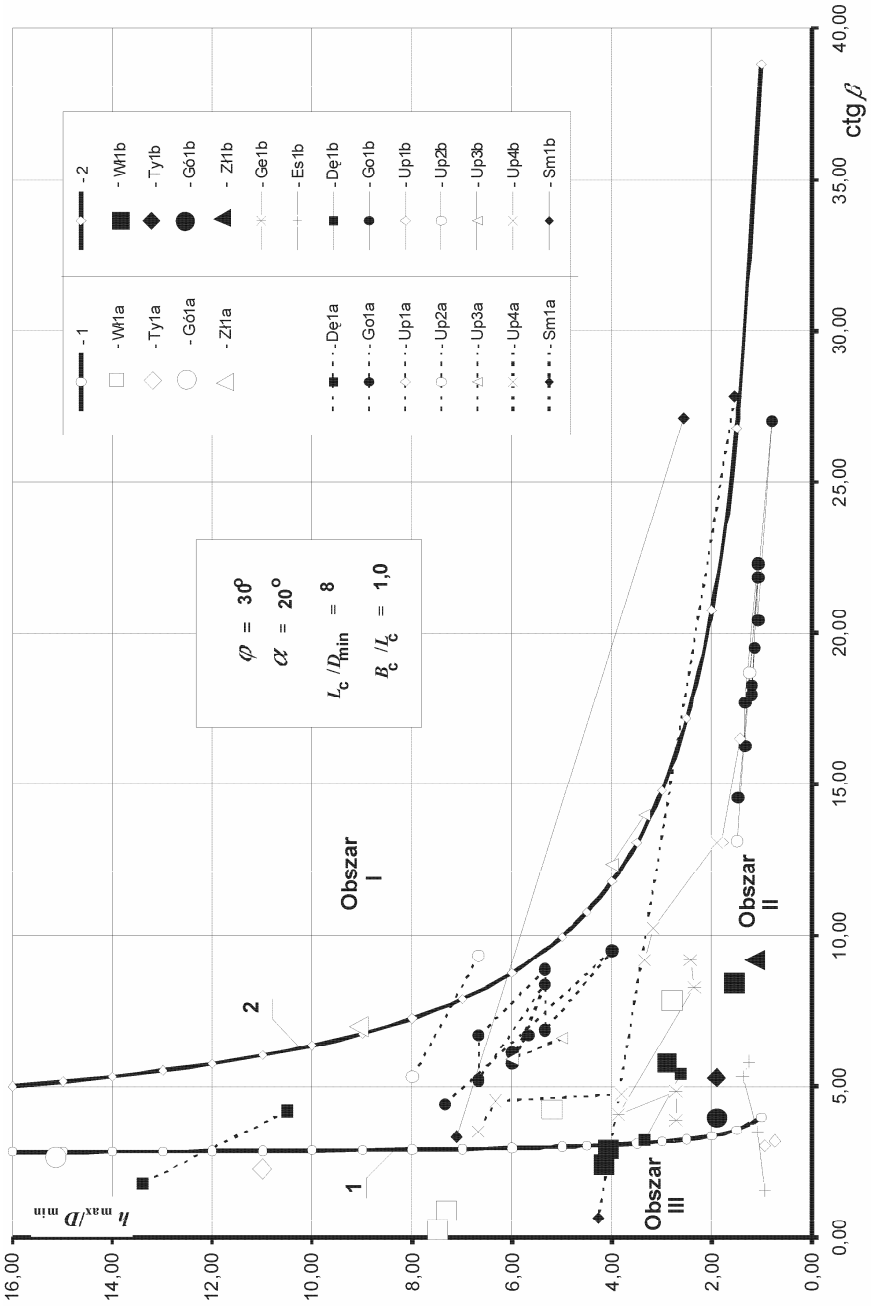
WYNIKI BADAŃ

Analizy obejmowały rzeczywiste wartości współczynników nachylenia prostych krytycznych występujące na obiektach oraz nachylenia graniczne obliczone według wzorów. Wartości te naniesiono na wspólny wykres na rysunku 1. W obliczeniach przyjęto: $\varphi = 30^o$, $\alpha = 20^o$, $p = 8$, $k = 1$, n z zakresu od 1,0 do 16,0. Współczynniki ctgβ uzyskane z badań terenowych dotyczyły pomiarów wykonanych w ramach prac Katedry oraz opublikowanych w literaturze (zamieszczono tylko te prace, które pozwoliły na określenie zarówno wartości h_{max} jak i L_{max}). Wartości współczynników ctgβ dla poszczególnych obiektów w różnych okresach ich eksploatacji obliczano na podstawie pomierzonych wartości h_{max} i L_{max} uzyskanych z literatury. Źródła danych, zestawienie obiektów, przyjęte oznaczenia serii oraz rok pomiaru po oddaniu obiektu do eksploatacji, jak też opisy występujących po tym czasie zniszczeń podano w tabeli 1. Gdy na obiekcie występowały dolne umocnienia sztywne, dodatkowo obliczano współczynnik nachylenia krytycznej prostej ctgβu dla tych elementów. Za minimalne zagłębienie Du_{min} przyjmowano grubość płyt lub długość pionowego elementu kończącego.

Na wykresie pokazanym na rysunku 1 naniesiono również graniczne krzywe bezpieczeństwa obliczone w artykule Bajkowski i inni [2002]. Graniczną wartość współczynnika nachylenia prostej bezpieczeństwa obliczoną dla warunku stateczności zastępczej ze stanu równowagi siły odporu gruntu E_g i tarcia T_g nazwano dolnym granicznym współczynnikiem nachylenia prostej krytycznej ctgβ_d, Dla warunku zakresu aktywnej strefy podłoża gruntowego współczynnik nachylenia krytycznej prostej obliczono z położenia górnej krawędzi skarpy wyboju w odległości od budowli, równej długości strefy wpływu fundamentu wywołującego w podłożu stan naprężeń L_a i nazwano go współczynnikiem górnym ctgβ_g. Wartości ctgβ_d (linia 1), ctgβ_g (linia 2) dzielą pole wykresu (rys. 1) na trzy strefy:

- obszar I wyznaczający położenie wyboju poza strefą wpływu fundamentu,
- obszar II określający stan zmiennego bezpieczeństwa,
- obszar III występowania stanu zagrożenia budowli wybojem tworzącym się w jej dolnym stanowisku.

Na większości analizowanych obiektów już w początkowym okresie eksploatacji wystąpiły rozmycia powodujące częściowe lub całkowite zniszczenie umocnień elastycznych. Uszkodzenia te były podstawą do przeprowadzenia napraw, które w dużym stopniu zmieniały konstrukcję i wymiary umocnień. Remonty te spełniły swoje zadania, gdyż ponownie tak duże rozmycia powstawały dopiero po kilkunastu latach. O położeniu rzeczywistych współczynników w określonym obszarze zagrożenia decydowały nie tylko rozmiary powstałych rozmyć, ale również głębokość posadowienia i obciążenie konstrukcji. Powstające na jazach rozmycia w większości przypadków nie przekraczały 8 głębokości posadowienia.



Rysunek 1. Współczynniki nachylenia krytycznej prostej: 1 – krzywa ctgβ_d, 2 – krzywa ctgβ_g

Figure 1. Slope coefficients of critical line: 1 – line ctgβ_d, 2 – line ctgβ_g

Tabela 1. Parametry identyfikacyjne badań terenowych
Table. 1. Identification parameters of the field studies

Lp.	Źródło danych Data source	Obiekt Object	Serie Series	Obliczane współczynniki Calculated coeffi-cients	Okres eksploatacji Exploitation period	Zakres zniszczeń Deformations range.
1.	Dąbkowski i inni [1992]	Tykocin	Ty1a, Ty1b	ctgβu, ctgβ	12	umocnienia elastyczne i sztywne
2.		Góra	Gó1a, Gó1b	ctgβu, ctgβ	10	umocnienia elastyczne i część sztywnych
3.		Złotoria	Zł1a, Zł1b	ctgβu, ctgβ	9	umocnienia elastyczne
4.	Dąbkowski i inni [1998]	Smrock	Sm1a, Sm1b	ctgβu, ctgβ	6	fundament starego jazu
5.	Dietz [1973]	Esslingen	Es1b	ctgβ	2	umocnienia elastyczne,
6.	Dietz [1969]	Geesthacht	Ge1b	ctgβ	9	umocnienia elastyczne
7.	Guńko [1961]	Upust 1	Up1a, Up1b	ctgβu, ctgβ	2	umocnienia elastyczne
8.		Upust 2	Up2a, Up2b	ctgβu, ctgβ	2	umocnienia elastyczne i część sztywnych
9.		Upust 3	Up3a, Up3b	ctgβu, ctgβ	2	umocnienia elastyczne i część sztywnych
10.		Upust 4	Up4a, Up4b	ctgβu, ctgβ	2,5	umocnienia elastyczne
11.	Kloze [1982]	Dębe	Dę1a, Dę1b	ctgβu, ctgβ	17	umocnienia elastyczne i prawie całe sztywne
12.	Popova [1982]	Gorki	Go1a, Go1b	ctgβu, ctgβ	24	uszkodzenie narzutu końcowego
13.	Śliwiński, Śliwińska [1987]	Włocławek	Wł1a, Wł1b	ctgβu, ctgβ	10	podmyte 2 ostatnie rzędy płyt wypadu
14.	Tarajmovič [1957]	Gorki	Go1a, Go1b	ctgβu, ctgβ	1	uszkodzenie płyt umocnienia sztywnego

Na stopniu wodnym Włocławek (serie Wł1a – dla umocnień i Wł1b – dla płyty) krytyczne wartości współczynnika dla roku 1972 układają się w strefie dużego zagrożenia zarówno dla płyt umocnień dolnych, jak i dla części progowej. W następstwie uszkodzeń powstałych w 1972 r. wykonano prace remontowe, które ukończono 4 lata później. Zaowocowało to zmniejszeniem nachylenia krytycznej prostej do około 9,0 z wartości 4. Wezbranie w 1979 roku spowodowało ponowny wzrost rozmyć. Dorównywały one tym z roku 1972 tylko poniżej niektórych świateł jazu, powodując miejscowe uszkodzenia ostatnich rzędów płyt betonowych. Część przelewowa jazu i elektrowni posiadały duże wartości współczynnika nachylenia analizowanej prostej.

Pomiary rozmyć poniżej jazów na rzece Narwi wykazały podobne tendencje zmian obliczanych charakterystyk dla wszystkich badanych jazów. Jazy te mają podobną konstrukcję i wymiary oraz warunki posadowienia. Wartości współczynników obliczone dla fundamentów płyt jazowych położone są w II obszarze. Dla jazów Tykocin i Góra współczynniki dla umocnień znalazły się w III obszarze zagrożenia (serie Ty1a i Gó1a), co uwidoczniło się ich zniszczeniem. Współczynnik nachylenia prostej bezpieczeństwa umocnień dla jazu

w Złotorii znajdował się w pobliżu krzywej 2 (seria Zł1a). Przeprowadzone oględziny budowli nie wykazały występowania znacznych uszkodzeń tych umocnień. Łatwo zauważyć, że o bezpieczeństwie płyty głównej jazu w dużej mierze decyduje trwałość umocnień sztywnych.

Na jazie Geesthacht (seria Ge1b) z upływem okresu eksploatacji narastało zagrożenie utraty stateczności konstrukcji. W okresie 9 lat eksploatacji współczynniki nachylenia granicznej prostej zmieniały się od ponad 9 do 4, pozostawały jednak ciągle w II strefie zagrożenia. Na jazie Esslingen (seria Es1b) z upływem okresu eksploatacji wzrosła głębokość rozmycia, jednak za sprawą oddalającego się od jazu miejsca najgłębszego rozmycia, zmniejszyło się nachylenie prostej zagrożenia. Pomiary wykonano w pierwszych 2 latach eksploatacji; w okresie tym wystąpiły dwa duże wezbrania.

Dla jazu Dębe punkty serii Dę1a (dla umocnień) dla roku 1976 znalazły się w II strefie, a dla roku 1979 w III. W czasie przejścia wezbrania w 1979 roku wystąpiło znaczne rozmycie dna poniżej jazu powodujące zniszczenie umocnienia dolnego. Wzrosło przez to zagrożenie utraty stateczności obiektu, jednak współczynniki obliczone dla fundamentu jazu w obu okresach pomiarowych pozostały w II strefie zagrożenia (seria Dę1b). Do utrzymania stateczności jazu w dużym stopniu przyczyniła się ścianka szczelna występująca poniżej niecki wypadowej.

Na jazie Gorki już w pierwszym roku eksploatacji wystąpiły znaczne rozmycia powodujące zniszczenie umocnień elastycznych oraz uszkodzenie płyt umocnienia sztywnego. Podjęte prace remontowe były na tyle skuteczne, że spowodowały ustanie procesu zniszczenia i wzrost współczynników nachylenia; podobnej wielkości rozmycia powstały dopiero po 19 latach eksploatacji (seria Go1a). W przeciągu okresu badawczego konstrukcja progowa jazu nie była zagrożona (seria Go1b). Pomiary, których wyniki prezentowane są w pracy Guńko [1961] prowadzono na jazach w początkowych latach ich eksploatacji. Dla 2-letniego okresu początkowej eksploatacji wystąpił spadek wartości obliczanych współczynników zarówno dla umocnień, jak i dla fundamentów płyt jazowych, większość z nich pozostawała jednak w II obszarze zagrożenia.

Stosunkowo duże różnice współczynników wystąpiły dla jazu w miejscowości Smrock. Kilka lat po wybudowaniu nowego jazu wartości współczynników $\mathrm{ctg}\beta u$ obliczone dla starej konstrukcji jazu, stanowiącej formę umocnień dolnych nowego jazu wynosiły 0,63 (seria Sm1a). Podobny spadek dotyczył współczynnika dla płyty fundamentowej nowego jazu (seria Sm1b).

WNIOSKI

Analizy zakresów zniszczeń umocnień dolnych oraz wartości współczynników nachylenia prostej zagrożenia wykazały, że:

– wartość współczynnika nachylenia krytycznej prostej zależny od parametrów gruntu podłoża, wielkości powstającego wyboju oraz głębokości posadowienia, wymiarów i obciążeń fundamentu,

– dolne i górne wartości granicznych nachyleń prostej zagrożenia zależą od parametrów geotechnicznych i geometrii układu podłoże – fundament,

– projektując budowle piętrzące, dużą uwagę należy zwracać na dobór długości i konstrukcję umocnień dolnych, gdyż wpływają one na bezpieczeństwo całego obiektu. Po zniszczeniu umocnień następuje szybki rozwój procesu rozmycia powodujący przesuwanie się wyboju w kierunku jazu oraz odsłanianie fundamentów budowli od strony wody dolnej.

– wymagane jest sprawdzanie stateczności budowli wodnej z uwzględnieniem prognozowanej lokalizacji skarpy wyboju,

– na końcu płyty jazowej i umocnień sztywnych należy przewidywać pionowe elementy, ścianki szczelne lub palisady, które w dużym stopniu zwiększają trwałość obiektu,

– dobierając konstrukcję umocnień elastycznych, należy uwzględnić ich stosunkowo szybkie zniszczenie i potrzebę częstej odbudowy.

BIBLIOGRAFIA

Bajkowski S., Siwicki P., Urbański J. *Wykorzystanie badań laboratoryjnych poniżej budowli wodnych do oceny ich bezpieczeństwa*. Acta Scientiarum Polonorum, Architectura 1–2, 2002.

Dąbkowski L., Sz., Bajkowski S., Hajkiewicz J. *Rozmycia dna koryta Narwi poniżej jazów*. Gospodarka Wodna 8/1992.

Dąbkowski L., Sz., Bajkowski S., Pietraszek Z. *Opinia naukowa o stanie przydatności jazu na rzece Orzyc w miejscowości Smrock*. Katedra Budownictwa Wodnego SGGW, Warszawa 1998.

Dietz J., W. *Kolksicherung durch Befestigungsstrecken für das Eidersiel*. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 29. Karlsruhe 1969.

Dietz J., W. *Sicherung der Flußsohle unterhalb von Wehren und Sperrwerken*. Wasserwirtschaft 63 (3), 1973.

Guńko F., G. *Niekatoryje rekomendacji po barbie s miestnymi razmyvami v nižnich biefach gidrouzłov*. Gosudarstviennoje Energetičeskoje Izdatielstvo. Moskwa–Leningrad 1961.

Kloze J., Mroziński J. *Obserwacje kontrolne i stan techniczny stopnia Dębe w czasie i po powodzi w 1979 r.*. Gospodarka Wodna 5/1982.

Popova K., S. *Osobiennosti razmyvov v otvodiaščem kanale Gorkovskoj GES*. Izviestia 154. ISSN 0368-0738. Energoizdat. Leningrad 1982.

Śliwiński W., Śliwińska A. *Stopień wodny we Włocławku. Raport w sprawie bezpieczeństwa stopnia.* Maszynopis. Hydroprojekt, Warszawa 1987.

Tarajmovič I., I.. *Piervyj god ekspluatacj vodoslivnoj płotiny Gorkovskoj GES*. Gidrotechničeskoje Stroitielstvo 9/1957.

Sławomir Bajkowski
Zakład Inżynierii Wodnej SGGW
ul. Nowoursynowska 166
02-787 Warszawa
slawomir_bajkowski@sggw.pl

Recenzent: *Prof. dr hab. inż. Tadeusz Bednarczyk*