

## **STABILIZACJA POKRYWY LODOWEJ POPRZEZ REDUKCJĘ ODPLYWU ZE ZBIORNIKA WŁOCŁAWEK**

Tomasz Kolerski  
Politechnika Gdańska

**Streszczenie.** Elektrownie i zbiorniki wodne położone w rejonach, gdzie mamy do czynienia ze zjawiskami lodowymi, wymagają specyficznego działania w celu efektywnego zarządzania nimi w sezonie zimowym. Pokrywa lodowa prowadzi do nieuniknionych strat w produkcji energii elektrycznej, jednak strata ta może być zminimalizowana poprzez utworzenie stosunkowo gładkiej pokrywy. Można to uzyskać poprzez odpowiednią eksploatację budowli piętrzącej. Aby uniknąć problemów związanych z blokowaniem ujść wody poprzez ich obmarzanie, należy prowadzić działania w celu ograniczenia produkcji śryżu w zbiorniku wodnym. Na skutek istnienia ciągłej pokrywy lodowej woda będzie izolowana od czynników atmosferycznych, co przełoży się na brak śryżu w zbiorniku. Na przykładzie zbiornika wodnego Włocławek wykazano skuteczność czasowego zmniejszenia natężenia przepływu przez stopień wodny w celu stabilizacji gładkiej pokrywy lodowej. Symulacje przeprowadzono przy wykorzystaniu modelu matematycznego DynaRICE, wykalibrowanego dla rozpatrywanego obszaru.

**Słowa kluczowe:** zbiornik Włocławek, pokrywa lodowa, termodynamika, modelowanie matematyczne, energetyka wodna

### **WSTĘP**

Na skutek kanalizacji rzeki zmieniają swój naturalny charakter, a przepływ podlega regulacji. W warunkach Polski i innych krajów leżących w podobnych strefach klimatycznych istotnym elementem pracy obiektów hydrotechnicznych jest ich eksploatacja w warunkach zimowych przy uwzględnieniu zjawisk lodowych. Konstrukcja stopni piętrzących powoduje zmniejszenie spadku zwierciadła wody w porównaniu z rzekami swobodnie płynącymi, gdzie z pewnym uproszczeniem można przyjąć, że spadek dna i spadek zwierciadła wody są lokalnie do siebie równoległe. Konsekwencją małego

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr inż. Tomasz Kolerski, Katedra Hydrotechniki, Wydział Inżynierii Łądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: [Tomasz.kolerski@wilis.pg.gda.pl](mailto:Tomasz.kolerski@wilis.pg.gda.pl).

spadku zwierciadła wody jest mniejsza prędkość przepływu i mniejsze naprężenia ścinające przy dnie w stosunku do rzeki naturalnej. W sezonie zimowym wymienione zjawiska przyczyniają się do łatwiejszego powstawania pokrywy lodowej w obszarze zbiornika oraz skutkują zwiększonym procesem akumulacyjnym śryżu.

Z punktu widzenia energetyki istotne jest zapewnienie minimalnych strat podczas eksploatacji zbiornika. W czasie zimy, gdy mamy do czynienia ze zjawiskami lodowymi, należy przywiązywać szczególną wagę do regulacji przepływu na stopniu wodnym. Prawidłowe sterowanie pracą zbiornika powinno prowadzić do utworzenia ciągłej i stosunkowo gładkiej pokrywy lodowej powstałej na skutek zamarzania przechłodzonej powierzchni wody. Jest to proces statyczny, zachodzący na skutek pionowej stratyfikacji wody podczas jej ochładzania. Gęstość wody jest zależna od jej temperatury i osiąga swe maksimum w temperaturze  $4^{\circ}\text{C}$ , co w przypadku braku mieszania turbulენტnego powoduje utrzymujący się stan równowagi termicznej podczas zamarzania wody. Gdy woda ochładza się do temperatury bliskiej  $0^{\circ}\text{C}$ , jedynie jej wierzchnia, lżejsza warstwa podlega schłodzeniu, czyli lód utworzy się na powierzchni wody. Dolna powierzchnia utworzonej w ten sposób pokrywy lodowej jest stosunkowo gładka, pozbawiona nieregularnie zmarzniętej kry lodowej czy podbitek śryżowych.

Dodatkowo, na skutek istnienia ciągłej pokrywy lodowej, woda w zbiorniku zostanie odizolowana od czynników zewnętrznych i pozostanie w stałej temperaturze około  $4^{\circ}\text{C}$  do końca zimy. W takich warunkach w zbiorniku nie będzie dochodziło do tworzenia się śryżu ani lodu dennego, co przekłada się na mniejsze opory ruchu i w konsekwencji mniejsze straty spadu. Lód prądowy formujący się i pozostający w przechłodzonej wodzie (poniżej  $0^{\circ}\text{C}$ ) jest w stanie aktywnym, czyli z łatwością przyczepia się do wszystkich obiektów znajdujących się w wodzie. Może wówczas dochodzić do blokowania ujęć wody, wlotów do elektrowni wodnych czy obmarzania ruchomych elementów zamknięć jazów i śluz żeglugowych. W sytuacji izolacji wody od czynników atmosferycznych śryż się nie wytworzy, a jeśli nawet dostanie się pod pokrywą lodową z górnego, niezamarzniętego odcinka rzeki, wówczas w dodatniej temperaturze wody nie będzie przymarzał do dna czy elementów infrastruktury hydrotechnicznej.

Utworzenie pokrywy lodowej na rzece lub zbiorniku nie rozwiązuje całkowicie problemu podbitek śryżowych i zatorów podwieszonych. Efekt może być zminimalizowany, lecz do akumulacji śryżu może dojść w górnej części zbiornika, gdzie znajduje się granica rzeki swobodnie płynącej i skanalizowanej. W tych miejscach pokrywa statyczna tworzy most lodowy dla kry napływającej z górnego, niezamarzniętego odcinka rzeki. Ze względu na zmianę spadku zwierciadła wody oraz istnienie przeszkody w postaci czoła pokrywy lodowej, jest to miejsce szczególnie narażone na powstawanie zatorów podwieszonych, formowanych z napływającego lodu [Grześ 1991]. Warunki hydrauliczne w tych przekrojach będą decydowały o tym, czy pokrywa lodowa rozbuduje się w górę rzeki w efekcie łączenia kry lodowej, czy będzie dochodziło do podpływania lodu pod istniejącą pokrywą i do akumulacji pod nią. W celu stabilizacji formowania dynamicznej pokrywy lodowej w newralgicznych lokalizacjach instaluje się w sezonie zimowym przegrody lodowe w formie pływających na powierzchni wody pontonów mocowanych do dna i brzegów rzeki lub dalb. Przegroda ma za zadanie powstrzymać spływ lodu w dół rzeki i zainicjować powstawanie dynamicznej pokrywy lodowej. Lokalizacja przegrody lodowej musi być dobrana w należyty sposób, aby zapewnić możliwie skuteczne jej dzia-



łania. Warunki przepływu w przekroju przegrody muszą być takie, aby nie dochodziło do nadmiernego podpływania form lodowych pod nią [Tuthill 1995].

Wymienione powyżej argumenty przemawiają za tym, że jeśli z dużym prawdopodobieństwem wiemy o nieuchronności powstania lodu na rzece, optymalnym rozwiązaniem jest stymulacja szybszego utworzenia pokrywy na całej jej długości. Oczywiście nie można podjąć żadnych działań w sytuacji rzeki swobodnie płynącej. W przypadku rzeki skanalizowanej możliwe jest sterowanie przepływem w taki sposób, aby doprowadzić do warunków sprzyjających uformowaniu pokrywy lodowej w formie statycznej. Wiąże się to ze zmniejszeniem przepływu do poziomu nienaruszalnego w okresie, gdy prognozowane są maksymalne straty ciepła z powierzchni wody. Zwykle dotyczy to mroźnych bezchmurnych nocy, gdy strumień promieniowania długofalowego z powierzchni wody jest największy. Jeśli stopień wodny jest wykorzystywany energetycznie, będzie to skutkowało zmniejszeniem lub całkowitym wstrzymaniem produkcji energii elektrycznej podczas operacji stabilizacji pokrywy lodowej. Jednak ze względu na osiągnięty skutek zminimalizowania strat spadku zostanie to wyrównane w całkowitym bilansie ekonomicznym. Analizę taką dla stopni energetycznych przeprowadza się np. w Kanadzie, USA i Skandynawii [Yapa i Shen 1984, Ettema i in. 2009, Gabre i in. 2011]. W Polsce tego typu działań się nie prowadzi mimo łatwych do uzyskania korzyści stosunkowo niewielkim kosztem.

Poniżej przedstawiono analizę matematyczną wskazującą na kierunek działania służącego przyspieszeniu powstania pokrywy lodowej na przykładzie zbiornika Włocławek. Zgodnie z instrukcją lodołamania dla zbiornika Włocławek [RZGW 2009], istnieje możliwość ograniczenia pracy elektrowni wodnej i zmniejszenia odpływu do przepływu biologicznego  $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , podczas gdy nadwyżka zostanie zmagazynowana w zbiorniku. W tym celu można wykorzystać pojemność retencyjną pomiędzy rzędną 57,00 m n.p.m., Kronstadt 86 (KR) a maksymalnym poziomem piętrzenia –  $\text{maxPP} = 57,5 \text{ m n.p.m.}$  KR. Normalny poziom piętrzenia dla zbiornika Włocławek wynosi  $\text{NPP} = 57,3 \text{ m n.p.m.}$  KR. Uzyskana w ten sposób rezerwa objętość, wynosząca ok. 32 mln  $\text{m}^3$ , może zapewnić stabilizację pokrywy lodowej na zbiorniku. Pokrywa lodowa utworzona w warunkach niskiego przepływu jest optymalnym rozwiązaniem z punktu widzenia energetyki wodnej i minimalizacji strat spadku. Dodatkowo operacja utworzenia stabilnej pokrywy zapewni wzrost efektywności przegród, co ograniczy dopływ lodu do zbiornika. Skutkiem tego będzie ułatwienie akcji lodołamania w okresie wiosennym. Sprawnie przeprowadzona akcja lodołamania i spławiania lodu przez stopień ma również wpływ na efektywność pracy elektrowni wodnej.

## BILANS CIEPLNY POWIERZCHNI WODY

Najistotniejszym elementem bilansu cieplnego rzeki jest wymiana ciepła, która odbywa się poprzez swobodną powierzchnię wody lub lodu. Na powierzchniową wymianę ciepła składają się takie czynniki jak promieniowanie krótko i długofalowe, ciepło parowania i kondensacji oraz ciepło przekazywane poprzez opad. W ogólnej postaci całkowity strumień ciepła traconego przez wodę można przedstawić za pomocą następującego równania [Liu i Shen 2005]:



$$\phi_{wa} = -\phi_R + \phi_B + \phi_C + \phi_H + \phi_S \quad (1)$$

gdzie:

- $\phi_{wa}$  – całkowity strumień ciepła na granicy między wodą a atmosferą,  $W \cdot m^{-2}$ ,
- $\phi_R$  – strumień ciepła wynikający z promieniowania krótkofalowego Słońca,  $W \cdot m^{-2}$ ,
- $\phi_B$  – promieniowanie długofalowe powierzchni Ziemi,  $W \cdot m^{-2}$ ,
- $\phi_E$  – strumień ciepła wynikający z efektu parowania,  $W \cdot m^{-2}$ ,
- $\phi_H$  – strumień ciepła konwekcyjnego,  $W \cdot m^{-2}$ ,
- $\phi_S$  – strumień ciepła wynikający z opadu deszczu lub śniegu,  $W \cdot m^{-2}$ .

Wyznaczenie składowych bilansu cieplnego wymaga znajomości danych meteorologicznych, które nie zawsze są dostępne. Na przykład człon w równaniu (1) dotyczący strumienia ciepła związanego z promieniowaniem długofalowym  $\phi_B$  jest nieliniową funkcją temperatury powietrza oraz wody lub lodu. Ze względu na niedostępność danych meteorologicznych możliwe jest zastosowanie formuł upraszczających opisujących poszczególne składowe bilansu cieplnego. Z uwagi na prostotę w aplikowaniu, w wielu modelach matematycznych stosuje się formuły liniowe do opisanego procesu wymiany ciepła. Tego typu podejście umożliwia uzyskanie dobrych wyników obliczeniowych, szczególnie w odniesieniu do procesów długoterminowych. Jednakże modele liniowe nie są w stanie wyznaczyć szczegółowych parametrów bilansu cieplnego podczas jednej doby. Dotyczy to zwłaszcza wielkości związanych ze strumieniem ciepła pochodzącego od promieniowania krótkofalowego. Z tego względu należy rozpatrzyć, które z wymagań są istotniejsze: szacunkowe obliczenia przy niepełnych danych wejściowych czy dokładne obliczenia uwzględniające wszystkie parametry atmosfery. Funkcja liniowa zależna od wielkości promieniowania krótkofalowego oraz temperatury wody i powietrza przedstawia się następująco [Liu i Shen 2005]:

$$\phi_{wa}^* = -\phi_{Rw} + \alpha' + \beta'(T_w - T_a), \quad (2)$$

gdzie:

- $\phi_{wa}^*$  – ciepło tracone na powierzchni wody,  $W \cdot m^{-2}$ ,
- $T_a$  – temperatura powietrza,  $^{\circ}C$ ,
- $T_w$  – temperatura wody,  $^{\circ}C$ ,
- $\alpha', \beta'$  – wykalibrowane stałe zależne od parametrów meteorologicznych,
- $\phi_{Rw}$  – promieniowanie krótkofalowe, obliczane niezależnie, na podstawie lokalizacji geograficznej oraz zachmurzenia,  $W \cdot m^{-2}$ .

## PROCES TWORZENIA POKRYWY LODOWEJ W WARUNKACH STATYCZNYCH

Tworzenie statycznej pokrywy lodowej inicjowane jest zwykle wzdłuż brzegów rzek i zbiorników wodnych. Warunki konieczne, które muszą być w tym celu zapewnione, to zarówno temperatura, jak i warunki przepływu wody. Aby doszło do tworzenia kryształów lodu, temperatura powierzchniowa wody musi spaść poniżej temperatury zamarzania (poniżej  $0^{\circ}C$ ). Warunki hydrodynamiczne zapewniające stabilizację stratyfikacyjną

kolumny wody to przede wszystkim brak nadmiernej turbulencji. W przypadku istnienia znacznych zawirowań w kierunku pionowym kryształy lodu utworzone na powierzchni wody będą wciągane w głębsze warstwy wody, gdzie ulegną roztopieniu lub staną się załącznikiem śryżu. W wykorzystywanym modelu matematycznym zastosowano następujące kryteria w celu ustalenia stref lodu statycznego:

1. Temperatura powierzchniowa wody  $T_{ws}$  jest poniżej krytycznej temperatury zamarzania  $T_{cr}$ ,  $T_{ws} < T_{cr}$ .
2. Prędkość ruchu lodu na skutek działania siły wyporu  $v_b$  jest większa od pionowej prędkości turbulencji,  $v_z$ ,  $v_b > v_z$ .
3. Wypadkowa prędkość wody uśredniona po głębokości jest większa od prędkości krytycznej  $u < V_{cr}$ .

Przyjęto, że temperaturę powierzchniową wody wyznacza się wg zaproponowanej przez Matuska [1984] formuły opracowanej na podstawie badań na rzece Ochrza (cz. Ohře) w ówczesnej Czechosłowacji:

$$T_{ws} = T_w - \frac{\phi_{wa}}{1130u + bW} \quad (3)$$

gdzie:

- $T_w$  – uśredniona po głębokości temperatura wody, °C,
- $W$  – prędkość wiatru na wysokości 2 m nad powierzchnią wody,  $m \cdot s^{-1}$ ,
- $u$  – uśredniona po głębokości, lokalna prędkość wody,  $m \cdot s^{-1}$ ,
- $\phi_{wa}$  – całkowity strumień ciepła na granicy między wodą a atmosferą,  $W \cdot m^{-2}$ ,
- $b$  – współczynnik uwzględniający szerokość kanału  $B$ , m, w kierunku działania wiatru:

$$b = \begin{cases} 15,0 & \text{gdy } B \leq 15,0 \text{ m} \\ -0,9 + 5,87 \ln B & \text{gdy } B > 15,0 \text{ m} \end{cases} \quad (4)$$

W przeprowadzonej dla zbiornika Włocławek analizie przyjęto parametr  $b$  zgodnie z powyższą formułą, powinien on jednak być wykalibrowany w odniesieniu do rzeczywistych danych. Również w przypadku krytycznej temperatury zamarzania przyjęto wartość zapożyczoną z literatury. Matousek [1984a] ustalił temperaturę krytyczną powierzchni wody  $T_{cr} = -1,1^\circ\text{C}$ , lecz była to wartość dla rzeki Ochrzy. Jest to niewielka rzeka (lewostronny dopływ Łaby), o średnim przepływie w ujściu w miesiącach listopad-grudzień wynoszącym  $40\text{--}60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Lal i Shen [1991] dokonali korekty temperatury krytycznej ( $T_{cr} = -0,5^\circ\text{C}$ ) na podstawie obserwacji stref zasięgu lodu brzegowego dla rzeki Św. Wawrzyńca. W bieżącej aplikacji odwołano się do temperatury krytycznej ustalonej dla rzeki Św. Wawrzyńca, w której warunki przepływu są bardziej zbliżone do zbiornika Włocławek.

Określenie pionowej prędkości turbulencji zostało opracowane przez Lal i Shen (1989) na podstawie formuły empirycznej ujmującej parametry związane z oporami przepływu, geometrią koryta oraz oddziaływaniem wiatru:

$$v_z = \left[ \left( \sqrt{C_* g} \frac{u n_b}{R^{1/6}} \right)^3 + \left( C_D \frac{\rho_a}{\rho_w} \right)^{3/2} W^3 \right]^{1/3} \quad (5)$$

gdzie:

- $C_*$  – współczynnik wiążący naprężenia ścinające przy dnie z prędkością turbulencji, przyjęto  $C_* = 0,25$ ,
- $n_b$  – współczynnik szorstkości Manninga dla dna,  $s \cdot m^{-1/3}$ ,
- $R$  – promień hydrauliczny, m;
- $C_D$  – współczynnik efektywności przekazywania siły od wiatru na powierzchnię wody,  $C_D = 1,3 \cdot 10^{-3}$ ,
- $\rho_a$  – gęstość powietrza,  $1,22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,
- $\rho_w$  – gęstość wody,  $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,
- $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Zgodnie z przyjętymi warunkami koniecznymi dla wytworzenia się statycznej pokrywy lodowej, prędkość wynoszenia kryształów lodu pod wpływem siły wyporu musi być większa od prędkości turbulencji wody. Jeśli warunek nie zostanie zachowany, wówczas będzie dochodziło do wciągania lodu pod powierzchnię wody. W przypadku przechłodzenia całej masy wody kryształy będą stanowiły jądra nukleacji dla lodu prądowego. W przeciwnym przypadku wytworzony na powierzchni lód ulegnie roztopieniu.

Ostatnim kryterium jest porównanie lokalnej prędkości średniej z prędkością graniczną dla statycznej pokrywy lodowej. Matousek [1984a] określił zakres prędkości krytycznej sprzyjającej powstawaniu lodu na powierzchni kanału dochodzący nawet  $0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  przy znacznym wypromieniowaniu ciepła z wody ( $\phi_{wa} > 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Proponowana przez niego wartość wydaje się nieco zawyżona. Badania laboratoryjne wykonane przez Hammar i in. (2002) wykazały znacznie mniejszy zakres prędkości krytycznej, przy której obserwowano lód utworzony na powierzchni wody. W zależności od temperatury powietrza lód formował się na powierzchni przy prędkości mniejszej od  $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Potwierdzają to wyniki eksperymentu numerycznego, który przeprowadzili Liu i Shen (2005). Porównywali oni strefy zasięgu lodu brzegowego w zbiorniku F.D. Roosevelta na rzece Św. Wawrzyńca przy różnych prędkościach granicznych wody. Wyniki pokazały, że dla temperatury powietrza  $-20^\circ\text{C}$  najlepsze rezultaty osiągnięto dla  $V_{cr} = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Dla temperatury powietrza  $-10^\circ\text{C}$  najlepszą zgodność z obserwacjami uzyskano przy braku tego kryterium, tj. gdy przyjmowano  $V_{cr} = 0,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Malenchak i in. [2008] oraz Bijeljanin i Clark [2010] dla rzeki Nelson w Kanadzie przyjmowali  $V_{cr} = 0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , uzyskując dużą zgodność wyników z obserwacjami. Ze względu na zakres średniej temperatury powietrza, przy której dochodzi do zamarzania zbiornika Włocławek (poniżej  $-10^\circ\text{C}$ ), oraz natężenie przepływu obserwowane w sezonie zimowym ( $400\text{--}900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), do obliczeń przyjęto  $V_{cr} = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Mimo dobrej zgodności przyjętego parametru z danymi przedstawionym w literaturze, sugerowane byłoby wykalibrowanie parametru prędkości krytycznej, przy której dochodzi do tworzenia lodu statycznego w odniesieniu do rzeczywistych stref zasięgu lodu brzegowego na zbiorniku Włocławek przy różnych temperaturach powietrza.



## SYMULACJE NUMERYCZNE STABILIZOWANIA POKRYWY LODOWEJ NA ZBIORNIKU WŁOCŁAWEK

Do przeprowadzenia symulacji niezbędne było obliczenie przepływu nieustalonego w warunkach istnienia pokrywy lodowej. W tym celu wykorzystano dwuwymiarowy model matematyczny DynaRICE, który umożliwia przeprowadzenie symulacji dynamiki lodu rzecznoego [Shen 2010]. Model składa się z dwóch, wzajemnie ze sobą powiązanych i współpracujących, podstawowych elementów: modelu hydrodynamicznego oraz modelu dynamiki i termodynamiki lodu. Równania hydrodynamiczne wykorzystywane w modelu są zmodyfikowanym układem równań płytkiej wody z uwzględnieniem przepływu pod pokrywą lodową, jak i poprzez rumowisko lodowe:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(q_{ix})}{\partial x} + \frac{\partial(q_{iy})}{\partial y} = \frac{\partial(Nt_i)}{\partial t}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial q_{ix}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_{ix}^2}{H_t} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_{ix}q_{iy}}{H_t} \right) = fq_y + \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} \right) - gH_t \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (7)$$

$$\frac{\partial q_{iy}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_{ix}q_{iy}}{H_t} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_{iy}^2}{H_t} \right) = -fq_x + \frac{1}{\rho} (\tau_{sy} - \tau_{by}) + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} \right) - gH_t \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (8)$$

gdzie:

- $q_{iy}, q_{ix}$  – przepływ wody pod pokrywą lodową w kierunku  $x$  i  $y$ ,  $m^3 \cdot s^{-1}$ ,
- $q_y, q_x$  – przepływ wody poprzez pokrywę lodową w kierunku  $x$  i  $y$ ,  $m^3 \cdot s^{-1}$ ,
- $f$  – porowatość lodu,
- $H_t$  – głębokość wody pod pokrywą lodową, m,
- $\eta$  – rzędna zwierciadła wody, m,
- $N$  – koncentracja lodu,
- $\tau_s$  – naprężenie styczne przy dolnej powierzchni lodu, Pa,
- $\tau_b$  – naprężenie styczne przy dnie, Pa,
- $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $m \cdot s^{-2}$ .

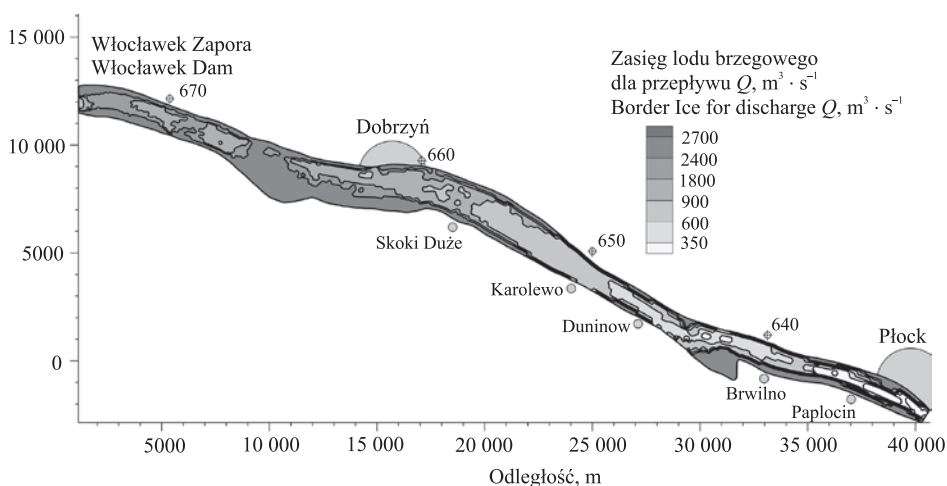
W modelu hydrodynamicznym pokrywa lodowa jest uwzględniona przez zmienione parametry geometryczne przekroju rzecznoego (obwód zwilżony i promień hydrauliczny) oraz dodatkowy współczynnik szorstkości dla dolnej powierzchni lodu ( $\tau_{sx}$  oraz  $\tau_{sy}$ ). Rozwiązanie równań hydrodynamicznych odbywa się za pomocą metody elementów skończonych przy wykorzystaniu zmodyfikowanego schematu Galerkinia [Liu i Shen 2003]. Kalibrację modelu hydrodynamicznego przeprowadzono na podstawie danych pochodzących ze zbiornika Włocławek z sezonu 1981/82 [Kolerski 2011].

Ze względu na brak kalibracji parametrów termodynamicznych modelu do warunków lokalnych uzyskane wyniki mogą stanowić jedynie szacunkowe przedstawienie zagadnienia. Jest to pierwsze przybliżenie w odniesieniu do operacyjnej redukcji natężenia przepływu na stopniu wodnym w celu stabilizacji pokrywy lodowej na zbiorniku Włocławek.



W przypadku próby aplikacji przedstawionej procedury do warunków rzeczywistych wymagana będzie szczegółowa kalibracja parametrów termodynamicznych modelu do warunków panujących na zbiorniku.

Pierwszym etapem pracy było wyznaczenie stref statycznego lodu brzegowego w warunkach przepływu ustalonego i dla stałej temperatury powietrza. Oznacza to, że w symulowanych warunkach nie nastąpi zmiana położenia zwierciadła wody w zbiorniku w wyniku redukcji odpływu na stopniu wodnym w stosunku do dopływu. Symulacje przeprowadzono dla szerokiego zakresu natężenia przepływu, poczynając od przepływu biologicznego ( $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), poprzez przepływ średni ( $900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), aż do przepływu  $2700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Zgodnie z raportem przedstawionym przez Hydroprojekt Warszawa [2002] dla przekroju Kępa Polska przepływ maksymalny o prawdopodobieństwie przewyższenia 50% wynosi  $Q_{50\%} = 3800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , jednak w grudniu, gdy najczęściej dochodzi do zamarzania zbiornika Włocławek, przepływ jest znacznie niższy. Na podstawie danych IMGW z lat 1991–2010, przepływ średni w Kępie Polskiej dla grudnia wynosi  $Q = 727 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a najwyższy przepływ z tych lat pomierzono 19.12.1994 – i wyniósł  $Q = 1650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .



Ryc. 1. Strefy zasięgu statycznej pokrywy lodowej w zbiorniku Włocławek dla przepływu  $350$ ,  $600$ ,  $900$ ,  $1200$ ,  $1800$ ,  $2400$  i  $2700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 1. Static border ice zones for Włocławek reservoir for water discharge  $350$ ,  $600$ ,  $900$ ,  $1200$ ,  $1800$ ,  $2400$  and  $2700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Zestawienie wyników modelowania przedstawiono na ryc. 1. Widać wyraźne powiązanie natężenia przepływu z powierzchnią zbiornika zajmowaną przez pokrywę lodową. Przy przepływie  $2700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  niemal na całej długości zbiornika obserwuje się obszary wolne od lodu. Pokrywa lodowa formuje się przy obu brzegach zbiornika, łącząc się jedynie na krótkim odcinku poniżej Dobrzyń (około km 660). Powierzchnia płoni zmniejsza się sukcesywnie wraz ze zmniejszeniem natężenia przepływu. W przypadku symulowania stałego przepływu przez zbiornik  $Q = 900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , pozbawiony pokrywy



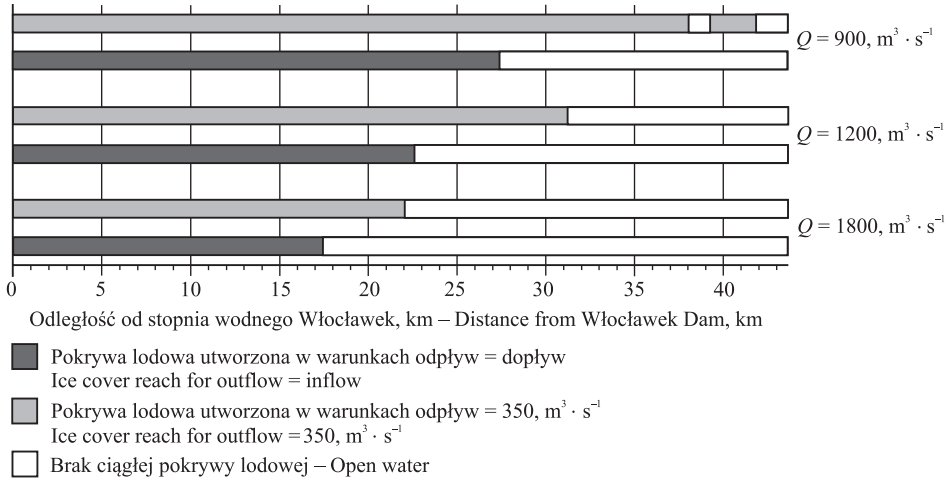


lodowej jest jedynie górny odcinek zbiornika od Karolewa do Płocka. Dalsze zmniejszenie przepływu do  $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  spowoduje, że statyczna pokrywa lodowa utworzy się na całej powierzchni zbiornika. Niewielka płoń widoczna jest wówczas jedynie w rejonie wodowskazu Płock.

Następnym etapem pracy było sprawdzenie możliwości redukcji odpływu przez stopień Włocławek do przepływu biologicznego ( $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), przy jednoczesnym dopływie do zbiornika równym 900, 1200 oraz  $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . W symulacji zakładano możliwość retencjonowania nadmiaru wody w zbiorniku pomiędzy rzędnymi 57,0 i 57,5 m n.p.m. KR. Na brzegu górnym założono dopływ wody przechłodzonej o temperaturze  $-0,001^\circ\text{C}$ . Podczas całej symulacji przyjęto stałą temperaturę powietrza równą  $-10^\circ\text{C}$ , która wywoływała intensywny strumień straty ciepła z powierzchni wody i lodu ( $\phi > 200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Warunkiem początkowym był układ zwierciadła wody dla stałego przepływu 900, 1200 lub  $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , bez zjawisk lodowych na zbiorniku. Przy takich warunkach początkowo-brzegowych obliczenia przeprowadzono do momentu osiągnięcia w zbiorniku rzędnej maksymalnego poziomu piętrzenia  $\text{NPP} = 57,5 \text{ m n.p.m.}$  na przedpolu jazu. W zależności od rozpatrywanego scenariusza obliczenia trwały od 6 do 24 godzin, do napełnienia pojemności retencyjnej. We wszystkich symulacjach założono brak dopływu lodu do zbiornika, co można interpretować jako skutecznie działanie przegrody lodowej ustawionej w km 630 (brzeg górny modelu).

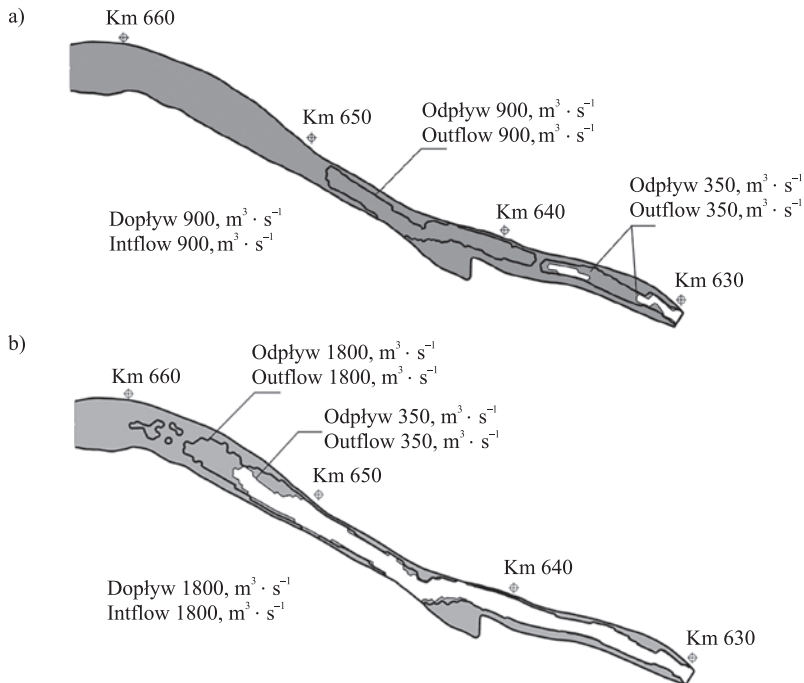
Dla dopływu  $900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  stabilna pokrywa lodowa utworzyła się na niemal całej długości zbiornika po 18 godzinach od rozpoczęcia symulacji (ryc. 2). Po tym czasie zwierciadło wody przekroczyło rzędną 57,30 m n.p.m. (NPP dla zbiornika Włocławek), a grubość lodu wynosiła od 0,5 cm w rejonie Brwilna do 3 cm na przedpolu jazu. Przy dalszym utrzymywaniu przepływu biologicznego na stopniu wodnym dochodzi do wypełnienia pojemności retencyjnej do rzędnej 57,5 m n.p.m., która zostaje osiągnięta po około 24 godzinach od początku symulacji. Grubość stałej pokrywy lodowej w rejonie stopnia przekracza 4,0 cm, a w górnej części zbiornika waha się w granicach 1–2 cm. Obszary wolne od lodu (płoń) znajdują się jedynie na jednokilometrowym odcinku poniżej brzegu górnego, oraz w rejonie Papłocina (ryc. 3a).

W kolejnej symulacji założono, że dopływ do zbiornika podczas zamarzania wynosi  $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , co jest przepływem wyższym od maksymalnego obserwowanego w grudniu w ostatnich 20 latach i stanowi dwukrotność przepływu średniego. Pozostałe dane wejściowe do modelu były identyczne z poprzednią symulacją. Ze względu na znacznie większy dopływ wypełnienie objętości retencyjnej odbyło się w krótszym czasie. Po 4 godzinach symulacji rzędna zwierciadła wody osiągnęła normalny poziom piętrzenia, a po kolejnych dwóch zbiornik wypełnił się do rzędnej 57,5 m n.p.m. W tym czasie pokrywa lodowa utworzyła się na odcinku od stopnia Włocławek do ok. km 653 (powyżej miejscowości Skoki Duże), osiągając grubość 1,5 cm w dolnej części zbiornika. W sytuacji bez regulacji przepływu (ryc. 1) lód brzegowy z niezamarzniętą centralną częścią zbiornika obserwowano na odcinku powyżej Dobrzynia. Oznacza to, że w symulowanych warunkach zmniejszenie natężenia przepływu na czas 6 godzin spowoduje zmniejszenie strefy potencjalnej produkcji śryżu o około 5 km (ryc. 3b).



Rys. 2. Wpływ redukcji odpływu do  $Q = 350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  na zasięg pokrywy lodowej na zbiorniku Włocławek

Fig. 2. Increase of the static ice cover due to outflow reduction at Włocławek Dam to  $Q = 350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



Ryc. 3. Redukcja strefy wolnej od lodu w górnej części zbiornika poprzez redukcję odpływu na stopniu wodnym; dopływ  $Q = 900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (a) i  $Q = 1800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (b)

Fig. 3. Open water zone decrease in upper reservoir reach due to flow reduction at the power dam; Upstream inflow  $Q = 900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (a) and  $Q = 1800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (b)

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Powstawanie śryżu w zbiornikach wodnych wpływa negatywnie na produkcję energii elektrycznej. W celu izolacji wody od czynników atmosferycznych niezbędne jest utworzenie pokrywy lodowej. Proces ten może być przyspieszony poprzez sterowanie odpływem na stopniu wodnym. Obliczenia wykazały, że przedstawiona metoda skutecznie ogranicza zjawisko produkcji śryżu. Na przykładzie zbiornika Włocławek pokazano, że w prosty sposób można przyspieszyć formowanie się ciągłej pokrywy lodowej poprzez czasową redukcję odpływu. Dokonano tego poprzez wykorzystanie objętości retencyjnej w zbiorniku w granicach rzędnych 57,0–57,5 m n.p.m. W zależności od występującego natężenia przepływu powyżej zbiornika operacja może być prowadzona przez 6 do 24 godzin. Przy dopływie do zbiornika zbliżonym do przepływu średniego ( $900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) sterownie odpływem prowadzi do utworzenia pokrywy lodowej na całej długości zbiornika. Redukcja zrzutu wody przez stopień wodny z  $1800$  do  $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  również spowodowała zwiększenie zasięgu pokrywy lodowej, lecz w tym wypadku jej zasięg jest zbliżony do strefy wyznaczonej dla scenariusza ze stałym przepływem  $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . W odniesieniu do minimalizacji strat w produkcji energii elektrycznej w sezonie zimowym optymalnym rozwiązaniem jest utworzenie gładkiej pokrywy lodowej na początku zimy. Opisywana metoda jest skutecznym środkiem do osiągnięcia wymaganego celu.

## PIŚMIENNICTWO

- Bijeljanić, M., Clark, S. (2010). Development of a Numerical Model for Predicting Ice Conditions on the Upper Nelson River, 20th IAHR International Symposium on Ice, Lahti, Finland.
- Ettema, R., Kirkil, G., Daly, S. (2009). Frazil ice concerns for channels, pump-lines, penstocks, siphons, and tunnels in mountainous regions, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 55(2), 202–211.
- Gebre, S., Alfredsen, K., Lia, L., Stickler, M., Tesaker, E. (2013). Review of ice effects on hydro-power systems. *J. Cold Regions Engin.*, 27(4), 196–222.
- Grześ, M. (1991). Zatory i powódzie zatorowe na dolnej Wiśle. Mechanizmy i warunki. PAN, Inst. Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Warszawa.
- Hammar, L., Shen, H.T., Evers, K-U., Kolarski, T., Yuan, Y., Sobczak, L. (2002). A laboratory study of freeze-up ice runs in river channels. 16th IAHR International Symposium on Ice, Dunedin, NZ, 3, 22–29.
- Hydroprojekt Warszawa (2002). Budowa stopnia wodnego w Nieszawie–Ciechocinku. Koncepcja programowo-przestrzenna. Cz. 1.
- Kolarski, T. (2011). Numerical modeling of ice jam formation in the Włocławek Reservoir. *Task Quart.*, 15(3–4), 283–295.
- Lal, A.M.W., Shen, H.T. (1989). An unsteady flow model for the Upper Niagara River. CEE Report 89-12, Clarkson University, Potsdam, New York, USA.
- Lal, A.M.W., and Shen, H.T. (1991). Mathematical model for river ice processes. *J. Hydraulic Engin.*, ASCE, 117(3), 851–867.
- Liu, L., Shen, H.T. (2003). A two-dimensional characteristic upwind finite element method for Transitional Open Channel Flow, CEE Report 03-04. Clarkson University, Potsdam, New York, USA.
- Liu, L., Shen, H.T. (2005). CRISSP2D Version 1.0 Programmer's Manual. CEE Report 05-19. Clarkson University, Potsdam, New York, USA.

- Malenchak, J., Doering, J., Shen, H.T., Morris, M. (2008). Numerical simulation of ice conditions on the Nelson River. 19th IAHR International Symposium on Ice. Vancouver, British Columbia, Canada, 251–262.
- Matousek, V. (1984a). Types of ice run and conditions for their formation. IAHR Symposium on Ice, Hamburg, Germany, 315-328.
- Matousek, V. (1984b). Regularity of the freezing-up of the water surface and heat exchange between water body and water surface. IAHR Symposium on Ice, Hamburg, Germany, 187–200.
- RZGW (2009). Instrukcja lodołamania i przepuszczania lodów przez stopień wodny we Włocławku. XI Aktualizacja. Włocławek, lipiec 2009.
- Shen, H.T. (2010). Mathematical modeling of river ice processes. Cold Region Sci. Techn., 62(1), 3–13.
- Tuthill, A.M. (1995). Structural ice control, review of existing methods. Cold Regions Res. Engin. Laborat., Report 95-18, Hanover NH.
- Yapa, P.D., Shen, H.T. (1984). Effect of ice cover on hydropower production. J. Energy Engin., 110(3), 231–234.

## ICE COVER PROGRESSION DUE TO FLOW REGULATION AT THE WŁOCLÁWEK DAM

**Abstract.** For hydropower generation in northern regions, the annual occurrence of river ice presents various problems of operation and management. The existence of ice can lead to a substantial loss in power production. This loss in power due to the presence of ice cover, however, can be mineralized with appropriate ice control operations. Frazil ice in water reservoirs may accumulate or can completely block the trash rack and rapidly and unexpectedly shut down the intake facility. Due to existence of solid ice cover, water is isolated from meteorological condition and frazil ice is not produced. This paper discuss possible operations on Włocławek reservoir leading to ice cover progression. Calibrated, two dimensional mathematical model DynaRICE was used for the simulations.

**Key words:** Włocławek reservoir, ice cover, thermodynamics, mathematical modeling, hydropower

XXXIII OGÓLNOPOLSKA SZKOŁA HYDRAULIKI – Zakopane 2014

Zorganizowana pod patronatem

Komitetu Gospodarki Wodnej Polskiej Akademii Nauk

przez

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

Dofinansowanie:

Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Krakowie

Wydanie publikacji zostało dofinansowane przez MGGP S.A.



*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 29.03.2015*

Do cytowań – For citation: Kolarski, T. (2015). Stabilizacja pokrywy lodowej poprzez redukcję odpływu ze zbiornika Włocławek. Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 14(1), 229–240.

