ISSN 1644-0765
DOI: http://dx.doi.org/10.15576/ASP.FC/2017.16.1.65
www.formatiocircumiectus.actapol.net/pl/

ACTA SCIENTIARUM POLONORUM

Acta Sci. Pol. Formatio Circumiectus 16 (1) 2017, 65–76

MODELOWANIE MATEMATYCZNE PRZEGRÓD LODOWYCH

Tomasz Kolerski
Politechnika Gdańska

Streszczenie. W celu ochrony przed niebezpiecznym zjawiskiem zatoru lodowego opracowano szereg metod, które można podzielić na metody czynne i bierne. Pierwsza grupa obejmuje działania techniczne prowadzące do mechanicznego lub termicznego usuwania lodu i neutralizacji zatorów. Wykorzystuje się w tym calu głównie lodołamacze lub innego typu jednostki pływające. Do metod biernych zalicza się przede wszystkim przegrody lodowe budowane w celu stabilizacji pokrywy lodowej, kierowania spływem lodu lub powstrzymywania dopływu lodu do pewnych odcinków rzek. Stosuje się dwa typy przegród: stałe, w formie pali stalowych lub żelbetowych oraz pływalne, instalowane w sezonie zimowym. Każda decyzja o próbie złagodzenia problemu zatoru lodowego poprzez instalacje przegrody lodowej powinna być poprzedzona wnikliwą analizą teoretyczną popartą obliczeniami matematycznymi. Brak takich analiz może prowadzić do błędnego projektu i, co za tym idzie, poniesienia kosztów budowy przegrody lodowej nie przynoszącej wymaganych efektów. Celem poniższej pracy jest przedstawienie sposobu modelowania matematycznego przegród lodowych stałych i pływalnych. W artykule przedstawiono podstawowe schematy pracy obu typów przegród i przedyskutowano warunki graniczne, przy których lód będzie akumulował się powyżej konstrukcji. Na koniec zaprezentowano wyniki obliczeń numerycznych dla istniejącej przegrody lodowej.

Słowa kluczowe: przegrody lodowe, modelowanie matematyczne, zatory lodowe, dynamika lodu

WSTĘP

Głównym celem budowania przegród lodowych jest kontrolowanie ilości przepływającego lodu w rzekach. Przez regulacje przepływu lodu rozumie się najczęściej zapobieganie powstaniu zatoru lodowego w miejscu, w którym spowoduje on znaczne straty ekonomiczne. Dodatkowo, poprzez inicjowanie rozbudowy pokrywy lodowej w górę rzeki, przegrody przyczyniają się do ograniczenia produkcji śryżu. Ze względu na sposób pracy przegrody lodowe można podzielić na dwie grupy: stałe i pływalne.

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr inż. Tomasz Kolerski, Katedra Hydrotechniki, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: tomkoler@pg.gda.pl.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2016

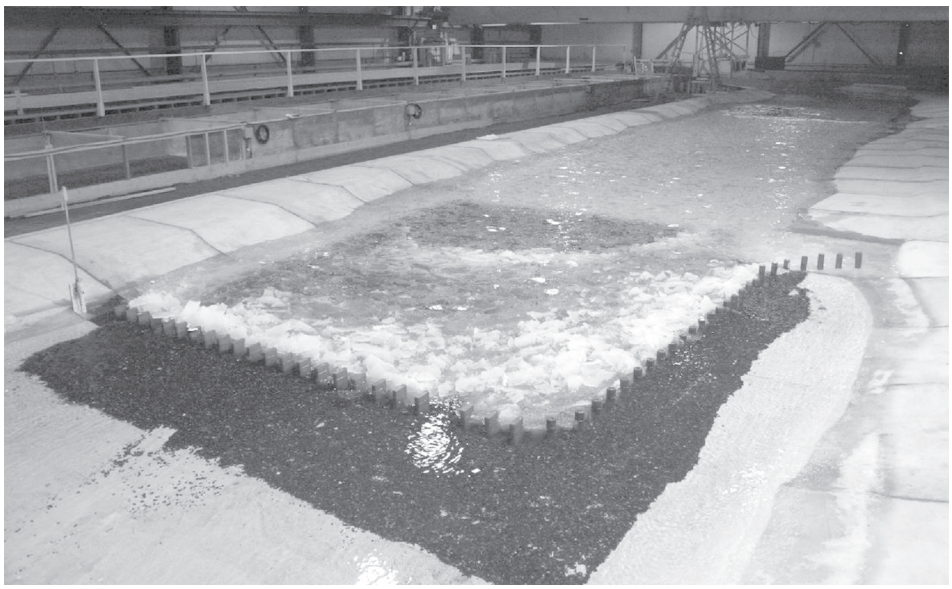
Z przegród stałych najczęściej stosowane są przegrody filarowe. Są wykonane z pali stalowych lub żelbetowych umocowanych w dnie rzeki. W zależności od potrzeb i lokalnych uwarunkowań stosuje się również bloki betonowe lub kamienne. W wyniku budowy stałej przegrody lodowej zator wytworzy się w zaplanowanym miejscu, gdzie nie będzie generował poważnych strat. Miejsca, w których przewiduje się realizację przegrody lodowej są specjalnie do tego celu przystosowane poprzez umocnienie dna (brukowanie) oraz przygotowanie kanału ulgi dla przepływającej wody. Dzięki zapewnieniu w ten sposób odpływu wody zator nie powoduje erozji dna oraz nie stwarza zagrożenia powodziowego. Dodatkowo, poprzez kontrolowane wytwarzanie zatoru, unika się oddziaływania znacznych sił wywieranych przez skumulowany lód na budowle hydrotechniczne. W wielu przypadkach siła pochodząca od dynamicznego i statycznego działania lodu może przekraczać 10 kN na metr bieżący konstrukcji. Takiego rzędu obciążenie w wielu przypadkach prowadzi do całkowitego zniszczenia urządzenia. Przegrody lodowe stałe stosuje się głownie na rzekach o niewielkim natężeniu przepływu oraz na takich, gdzie objętość lodu podlegającego zatrzymaniu nie jest zbyt duża.

Przegrody stałe wykonano w kilku lokalizacjach w północnej części Stanów Zjednoczonych. Warto wymienić budowlę o nazwie Iroquois Dam na rzece św. Wawrzyńca czy przegrodę zbudowaną na potoku Cazanovia Creek w pobliżu Buffalo [Tuthill 1995]. Dobrym przykładem sposobu projektowania przegrody filarowej stałej jest budowla, która planowana była do realizacji na rzece Grasse w stanie Nowy Jork [Alcoa 2009]. Konstrukcja ta miała za zadanie zatrzymać dopływ lodu z górnego odcinka rzeki i uniemożliwić powstawanie zatorów w jej dolnym biegu. Było to podyktowane głównie potrzebą zabezpieczania dna rzeki przed erozją na skutek koncentracji przepływu pod akumulacją lodową. Sytuacja taka miała miejsce w 2003 r., kiedy na skutek niekontrolowanego zatrzymania spływu lodu zaobserwowano intensywną erozję denną. Możliwości retencjonowania lodu przez projektowaną budowlę badano na modelu hydraulicznym wykonanym w laboratorium CRREL (Cold Region Research and Engineering Laboratory – ryc. 1) i na modelu matematycznym [Kolerski i in. 2008]. Przegroda miała składać się z cylindrycznych i prostokątnych pali umieszczonych w odległości od 3,0 do 4,6 m, z kanałem ulgi przy lewym brzegu rzeki. Ostatecznie projekt nie został zrealizowany ze względów finansowych.

W warunkach polskich nie ma możliwości ustawienia tego typu przegrody na rzekach najbardziej podatnych na zjawiska zatorowe, czyli Dolnej Odrze lub Wiśle. W przypadku Odry skutkowałoby to akumulacją ogromnej ilości lodu dopływającego zarówno z Górnej i Środkowej Odry, jak również ze wszystkich dopływów zasilającej rzekę poniżej stopnia Brzeg Dolny. Można jednak rozpatrzyć ustawienie przegrody filarowej, jako urządzenia naprowadzającego spływ lodu po wcześniej wytypowanym torze. Przykładowo zapora filarowa mogłaby ukierunkować spływ lodu w rejonie Widuchowej, uniemożliwiając jego dopływ do Odry Zachodniej. Aktualnie rozpatruje się umiejscowienie w tym rejonie przegrody pływalnej lub utworzenie kierownicy dla lodu zbudowanej z trzech pontonów zacumowanych do brzegu i zakotwiczonych do dna [Polak 2001]. Warto zastanowić się nad wykonaniem takiej inwestycji w północnej części Jeziora Dąbie w rejonie ujścia Iny, gdzie w nowym wariancie toru wodnego (wariant IIIB) przewidziano zakręt na planowanym torze wodnym [PROEKO, 2003]. W przypadku Wisły można rozpatrzyć wybudowanie przegrody filarowej w celu nakierowywania lodu spławianego przez planowany stopień wodny

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

poniżej Włocławka (lokalizacja w miejscowości Nieszawa [Kolerski 2016]). Oczywiście, ze względu na duży koszt takiej inwestycji, proponowane rozwiązanie wymaga szczegółowej i wielowariantowej analizy przy wykorzystaniu modelu matematycznego.



Ryc. 1. Model laboratoryjny filarowej przegrody lodowej projektowanej na rzece Grasse w stanie Nowy Jork; przy lewym brzegu widoczny jest kanał ulgi [Tuthill i in. 2008]
Fig. 1. Hydraulic model of the pier type ice control structure on the Grasse River; relief channel on the left bank [Tuthill, et al. 2008]

Przegrody pływalne są znacznie bardziej rozpowszechnione, ze względu na szerszy zakres ich stosowalności w celu kontroli spływu lodu. Składają się one z unoszących się na powierzchni wody drewnianych bali lub stalowych pontonów połączonych liną stalową lub łańcuchem [Foltyn i Tuthill 1996]. Całość jest zakotwiczona do dna i brzegów rzeki. Dzięki temu przegroda może być instalowana na początku sezonu zimowego i usuwana po ustąpieniu lodu. Jest to bardzo wygodne rozwiązanie, gdyż nie występuje kolizja z innymi użytkownikami rzeki w sezonie żeglugowym. Zadaniem przegrody pływalnej jest zainicjowanie rozbudowy pokrywy lodowej podczas jej formowania [Kolerski 2015]. Przegrody odgrywają również istotną rolę podczas ruszenia lodu, ograniczając spływ lodu z jezior do rzek (np. pomiędzy jeziorem Erie a rzeką Niagarą [Shen i in., 1997]) oraz dopływ lodu z rzek do zbiorników wodnych (np. przegroda na zbiorniku Włocławek [Polak 1990]).

Praca przegrody pływalnej polega na zatrzymaniu lodu spływającego rzeką w miejscu do tego przeznaczonym. Jest to konstrukcja unosząca się na wodzie, co oznacza, że lód jest wstrzymywany warunkowo, do momentu, gdy siła przenoszona przez pływające elementy przegrody nie przekroczy siły granicznej, która jest wypadkową siły wyporu pontonów i sił napięcia liny. Po przekroczeniu wartości granicznej pontony ulegną zatopieniu, a lód będzie przemieszczał się ponad nimi. Przegroda wynurzy się ponownie

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

w momencie, gdy siła wyporu przeważy nad siłą ciężkości przepływającego lodu. Inaczej rzecz ujmując, przegroda wypłynie na powierzchnię, gdy grubość przepływającego lodu będzie stosunkowo mała, co pozwoli na przebicie się pontonu poprzez poruszający się lód. Ze względu na opisany powyżej sposób pracy przegrody, aby nie powodować zrzutu całości zgromadzonego lodu powyżej przegrody, wykonuje się ją z niezależnych segmentów. Przykład przegrody zastosowanej na jeziorze Erie pokazano na zdjęciu lotniczym (ryc. 2), wykonanym 9 kwietnia 2009 roku podczas wiosennego ruszenia lodu.

Ryc. 2. Przegroda lodowa na jeziorze Erie podczas ruszenia lodu 9 kwietnia 2009 r. widok od wschodu na przęsła R – U (Niagara Ice Flight, Gomez and Sullivan Engineers, P.C.)

Fig. 2. Erie-Niagara River ice boom operation during the April 9th 2009 breakup, spans R – U (Niagara Ice Flight, Gomez and Sullivan Engineers, P.C.)

Decyzja o instalacji przegrody lodowej powinna być wynikiem analizy teoretycznej popartej wynikami obliczeń numerycznych. Analogiczne obliczenia zostały przeprowadzone dla rzeki Grasse [Kolerski i in. 2008] oraz dla przegrody lodowej na jeziorze Erie [Shen i in. 1997], gdzie na etapie koncepcji i planowanego rozwiązania technicznego skorzystano z wyników uzyskanych z modelu matematycznego DynaRICE.

MODELOWANIE MATEMATYCZNE PRZEGRÓD LODOWYCH

Przegrody lodowe stałe i pływające są specyficzną barierą, która umożliwia przepływ wody, natomiast zatrzymuje lód. Z tego powodu powyżej przegrody lodowej będzie rozbudowywała się dynamiczna pokrywa lodowa, która w zależności od lokalnych warunków hydraulicznych może osiągać różną miąższość. Przegrody pływalne pełnią swoją funkcje jedynie w przypadku, gdy nie dojdzie do przekroczenia warunków granicznych, po czym przestają one powstrzymywać ruch lodu. Przegrody pływalne konstruowane są w formie utrzymujących się na powierzchni wody pontonów (pnie drzew lub stalowe beczki). Pozwalają one na stabilizację czoła pokrywy lodowej poprzez zatrzymanie spływu lodu w dół rzeki. W przypadku obciążenia większego niż projektowane pontony zanurzają się pod powierzchnię wody, pozwalając na dalszy spływ lodu. Gdy siła wyporu pontonów jest większa niż naprężenie zginające lodu, przegroda ponownie wynurza się na powierzchnię. Analizując ten mechanizm można zdefiniować podstawowe kryterium

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

pracy przegrody, jakim jest jego wytrzymałość na siłę pochodzącą od zgromadzonego powyżej lodu. Oczywiście przekroczenie tej siły nie jest jednoznaczne ze zniszczeniem konstrukcji, a jedynie z przerwaniem jej pracy.

W przypadku przegród stałych teoretycznie całość dopływającego lodu powinna być przez przegrodę retencjonowana. W praktyce może dochodzić do sytuacji, gdy lód przedostaje się przez przestrzenie pomiędzy palami. Badania laboratoryjne wykonane dla przegrody stałej na rzece Grasse w stanie Nowy Jork [Tuthill i in. 2008], wskazały na nieszczelność przegrody stałej. Wyniki testów na modelu fizycznym pokazały, że przegroda filarowa powodowała przepuszczenie ok 4% lodu.

Modelowanie matematyczne pracy przegród lodowych będzie w pierwszej kolejności wymagało określenia warunków granicznych, po przekroczeniu których przegroda przestaje pełnić swoja funkcję. W przypadku przegród pływalnych istnieją cztery kryteria, które musza być spełnione w celu zainicjowania procesu akumulacji lodu powyżej przegrody:

1. Krytyczna liczba Froude'a – dla dopływającej kry lodowej (jeśli wartość jest wyższa od zdefiniowanej, następuje obrócenie i podpłynięcie kry lodowej pod przegrodą). Kryterium to dotyczy jedynie pojedynczych kier lodowych, czyli jest stosowane w początkowej fazie rozbudowy pokrywy lodowej.
2. Prędkość krytyczna –jeśli prędkość jest większa od zdefiniowanej, nastąpi erozja lodu i jego podpływanie pod przegrodą. Jest to kryterium odniesione do lodu akumulującego się powyżej przegrody, w którym nie występuje połącznie pojedynczych kier lodowych wskutek ich zamarznięcia. Można tu zauważyć analogię do zjawisk erozyjnych na dnie rzeki.
3. Krytyczna wysokość przegrody lodowej – jest to warunek stosowany wraz z kryterium prędkości erozyjnej, który mówi o tym, że jeśli akumulacja lodu jest mniejsza od wysokości przegrody, erozja nie nastąpi. W celu wyeliminowania lub zminimalizowania efektu erozji akumulacji lodowej stosuje się przegrody z fartuchami mającymi na celu zatrzymywać wyerodowany lód (np. przegroda na jeziorze Notoro na wyspie Sapporo [Kolerski i in. 2013]).
4. Krytyczne obciążenie przegrody lodem – gdy siła od lodu będzie wyższa od projektowanej siły krytycznej, nastąpi zanurzenie przegrody i kra lodowa przepłynie ponad nią. Określenie siły granicznej jest niezbędne w celu doboru wielkości pontonów. Zbyt małe pontony będą podlegały zanurzeniu, przez co przegroda nie będzie pełniła swojej funkcji. Z drugiej strony nie należy przewymiarować budowli, mając na uwadze, że jest ona tylko okresowo ustawiana w miejscu swej pracy, a przez pozostałą część roku będzie składowana na brzegu rzeki. Im większe będą elementy przegrody, tym trudniejszą operacją będzie jej coroczna instalacja i demontaż.

Należy również określić warunek, który zapewni ponowne wynurzenie się przegrody na powierzchnię wody i powrót do stanu wyjściowego. W tym przypadku będzie to związane z porównaniem wytrzymałości lodu na zginanie w stosunku do siły wyporu od pojedynczego pontonu. Analizę taką można przeprowadzić w odniesieniu do typowej grubości pojedynczej warstwy lodu obserwowanej w przeszłości na danym odcinku rzeki.

Szerszego komentarza wymaga kryterium związane z erozją akumulacji lodowej powyżej przegrody lodowej. Erozja zatoru lodowego była dyskutowana w pracach Ashton [1974], Uzuner [1977] oraz Daly i Axelson [1990], w których, na podstawie różnych wskaźników, określano wartość graniczną, przy której stabilność akumulacji jest

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

zaburzona. Najczęściej odnosi się stabilność rumowiska lodowego do funkcji kształtu pojedynczej kry lodowej oraz lokalnej prędkości wody pod lodem. Prędkość ta jest określana mianem prędkości erozyjnej, natomiast jej wartość jest wciąż szacunkowa i zazwyczaj przyjmowana jako V_{er} = 1,5 m · s^{-1}, zgodnie z pomiarami wykonanymi na modelu hydraulicznym rzeki Missouri sporządzonym w laboratorium CRREL w skali 1:25 [Tuthill i Gooch 1998]. Podobne badania przeprowadzono również w laboratorium hydraulicznym Politechniki Gdańskiej, lecz w tym wypadku stosowano materiał o parametrach zbliżonych do lodu. Podczas eksperymentu pokrywę lodową imitowała płyta ze sklejki wodoodpornej, pod którą wprowadzono materiał o gęstości zbliżonej do gęstości lodu (gęstość przyjętego materiału: ρ_m = 820 kg · m^{-3} co stanowi 90% gęstości lodu: ρ_L = 920 kg · m^{-3}). Następnie, zwiększając natężenie przepływu, obserwowano, czy znajdujące się pod pokrywą płytki imitujące lód ulegną erozji. W momencie ruszenia materiału i rozmycia akumulacji dokonywano pomiaru prędkości wody bezpośrednio pod pokrywą. Uwzględniając efekt skali, prędkość, przy której następowało rozmycie podbitek, wynosiła V_{er} = 1,1 m · s^{-1}. Jest to prędkość mniejsza od obserwowanych w laboratorium CRREL, co wynika głównie z tego, że w badaniach posługiwano się materiałem, który nie jest lodem, a jedynie ma zbliżoną do niego gęstość.

Z punktu widzenia niezawodności pracy przegrody pływającej najbardziej istotnym kryterium jest to związane z wielkością siły pochodzącej od napierającego na przegrodę lodu. Siły działające na kierunkach x i y wyznacza się z następujących równań [Liu i Shen, 2000]:

$$\sum F_x = -\sigma_{xx} N \eta dy - \sigma_{yx} N \eta dx + XN \eta dl + \frac{1}{2} \tau_{ix} Ndxdy + \frac{1}{2} \tau_{ax} Ndxdy + \frac{1}{2} \rho N \frac{dh}{dx} dxdy = 0 \tag{1}$$

$$\sum F_y = -\sigma_{yy} N \eta dx - \sigma_{xy} N \eta dy + Y N \eta dl + \frac{1}{2} \tau_{iy} Ndxdy + \frac{1}{2} \tau_{ay} Ndxdy + \frac{1}{2} \rho N \frac{dh}{dy} dxdy = 0 \tag{2}$$

gdzie:

- X, Y – komponenty siły reakcji przegrody lodowej, N,
- N – koncentracja lodu, —,
- η – grubość pokrywy lodowej, m,
- τ_{ix} – naprężenia styczne na dolnej powierzchni lodu wytworzone przez przepływ wody, Pa,
- τ_{ax} – naprężenie styczne wytworzone na skutek działania wiatru na lód, Pa,
- σ_{xx}, σ_{yy} – składowe normalne tensora naprężeń wewnętrznych w lodzie lub rumowisku lodowym, Pa,
- σ_{xy}, σ_{yx} – składowe styczne tensora naprężeń wewnętrznych w lodzie lub rumowisku lodowym, Pa,
- x, y – zmienne niezależne odniesione do odległości, m,
- l – wymiar podłużny ściany, m.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Wyznaczając X i Y z powyższych równań, oraz pomijając człony wyższego rzędu, otrzymujemy:

$$X = -\sigma_{xx}\frac{dy}{dl} + \sigma_{yx}\frac{dx}{dl}, \tag{3}$$

$$Y = -\sigma_{yy}\frac{dx}{dl} + \sigma_{xy}\frac{dy}{dl}, \tag{4}$$

Z powyższych równań łatwo wyznaczyć naprężenia normalne i styczne działające na wycinek przegrody o długości *dl*:

$$\sigma_n = X\frac{dy}{dl} + Y\frac{dx}{dl} = \sigma_{xx}\left(\frac{dy}{dl}\right)^2 + \sigma_{yy}\left(\frac{dx}{dl}\right)^2 + \sigma_{yx}\frac{dx}{dl}\frac{dy}{dl}, \tag{5}$$

$$\sigma_t = -X\frac{dx}{dl} + Y\frac{dy}{dl} = \left(\sigma_{yy} - \sigma_{xx}\right)\frac{dx}{dl}\frac{dy}{dl} + \sigma_{yx}\left[\left(\frac{dy}{dl}\right)^2 + \left(\frac{dx}{dl}\right)^2\right]. \tag{6}$$

Określenie sił normalnej i stycznej do przegrody sprowadza się do pomnożenia uzyskanych naprężeń przez lokalną koncentrację lodu i grubość pokrywy lodowej:

$$F_n = \sigma_n N \eta \tag{7}$$

$$F_t = \sigma_t N \eta \tag{8}$$

Przedstawiona powyżej procedura umożliwia w jednoznaczny sposób obliczenie naprężeń normalnych i stycznych do budowli liniowej. Znajomość naprężeń może być wykorzystana przy projektowaniu grubości liny łączącej pontony. Obliczenie siły krytycznej, która spowoduje zerwanie liny, jest przeprowadzone przy założeniu półkolistego kształtu przegrody przy powstrzymywaniu lodu. Naprężenie kabla oblicza się z formuły [Shen i in. 1997]:

$$T = \frac{1}{2\cos\alpha_p}\int_0^{L_p} F_n\, dl \tag{9}$$

gdzie:

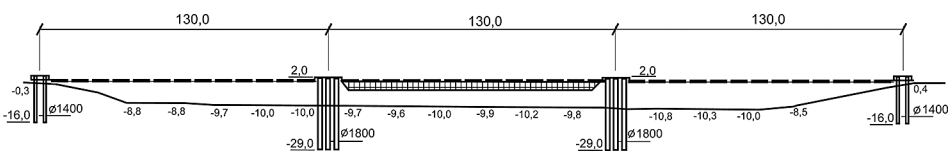
α_p – kąt nachylenia przegrody;
L_p – rozpiętość segmentu przegrody [m].

Z punktu widzenia rozwiązania numerycznego, w którym dynamika lodu jest opisana równaniami dyskretnymi bezsiatkowej metody SPH, lokalizacja budowli jest niezależna od rozmieszczenia dyskretnych cząstek, co jest bardzo wygodne przy skomplikowanych układach przegród. Z drugiej jednak strony, nie ma możliwości uwzględnienia nabiegania lodu na konstrukcję pochyłą, jak również obliczenia sił będą wykonywane jedynie w uprzednio zdefiniowanych lokalizacjach. Przedstawione powy-żej ujemne aspekty nie mają znaczenia w modelowaniu przegród lodowych, których lokalizacja jest ustalona, natomiast nachodzenie lodu na przegrodę jest równoznaczne z jej zanurzeniem.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

IMPLEMENTACJA MODELU MATEMATYCZNEGO DO PRZYKŁADU RZECZYWISTEGO

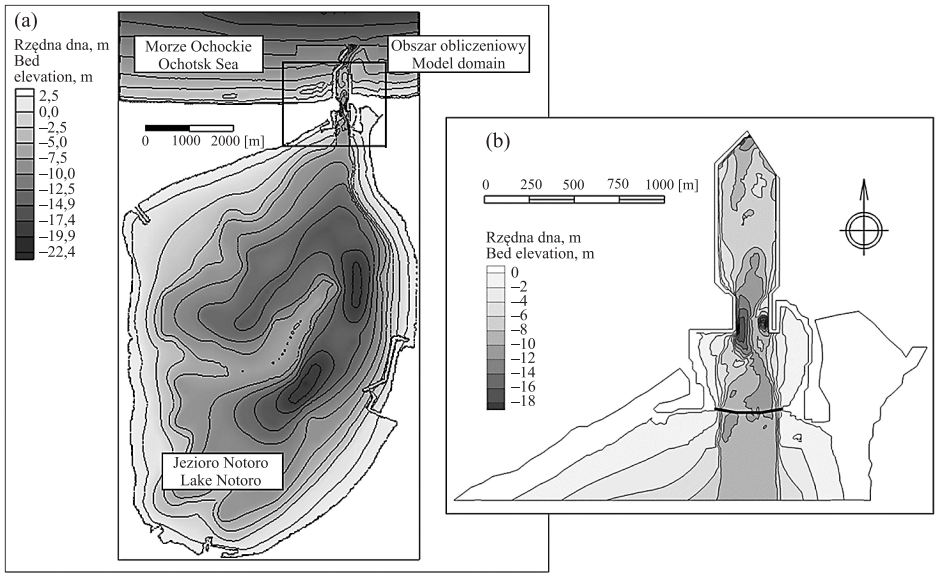
Projektowanie pływalnych i stałych przegród lodowych przy wykorzystaniu modelu matematycznego, w którym uwzględniono wszystkie powyższe kryteria, zaprezentowano w pracach Shen i in. [1997], Kolerski i in. [2008] oraz Kolerski i in. [2013]. Poniżej przedstawiono przykład projektu przegrody lodowej zainstalowanej na przybrzeżnym jeziorze Notoro na wyspie Sapporo w Japonii. Potrzeba instalacji prze-grody lodowej na cieśninie łączącej jezioro z morzem Ochockim wynikała z wymogu zapewnienia niezmiennego zasolenia wód jeziora. W przypadku niekontrolowanego dopływu kry lodowej z morza Ochockiego, lód mógłby pozostać w jeziorze do wiosny, kiedy podlegałby stopieniu. Lód zawiera znacznie mniejszą ilość soli w stosunku do wody morskiej, a co za tym idzie roztopienie znacznej ilości lodu zgromadzonego w niewielkim akwenie spowoduje zmniejszenie zasolenia wody w tym obszarze. Dbałość o utrzymanie niezmiennego zasolenia wód jeziora wynika z prowadzonej w tym akwe-nie intensywnej gospodarki rybackiej, która bazuje głównie na przegrzebkach i ostrygach. Są to organizmy bardzo czułe na zmianę zawartości soli w wodzie. W celu powstrzymania dopływu lodu do jeziora, postanowiono zainstalować pływalną przegrodę lodową składającą się z trzech przęseł mocowanych na dalbach, z których każde liczyło 130 metrów w linii prostej między dalbami (ryc. 3). W centralnej części przegrody przewidziano fartuch mający na celu wyłapywanie lodu erodowanego i podpływającego pod przegrodą.



Ryc. 3. Przekrój poprzeczny przez przegrodę lodową na jeziorze Notoro w Japonii
Fig. 3. Cross-sectional view of the ice boon on the Notoro Lake in Japan

Dane batymetryczne jeziora oraz obszaru morza Ochockiego w odległości do 2 km od brzegu wyspy Sapporo o rozdzielczości 20 × 20 m, pochodziły z pomiaru wykonanego w 2006 [HTRCCR 2006]. Model matematyczny zaimplementowano początkowo do całego obszaru jeziora, a następnie wykorzystano wyniki obliczeń jako warunki brzegowe dla mniejszego obszaru w rejonie cieśniny łączącej jezioro z morzem (ryc. 4). Przegrodę lodową modelowano w postaci trzech przęseł o układzie liniowym, składają-cych się z pięciu segmentów każde (ryc. 4b). Warunki graniczne dla przegrody ustalono zgodnie z przedstawionymi powyżej i zalecanymi w literaturze wartościami, tj. krytyczną liczbą Froude'a Fr_{cr} = 0,09 i prędkością erozyjną, V_{er} = 1,5 m · s^{-1}. W oblicze-niach przyjęto wysoką wartość krytycznej siły normalnej F_n = 10 kN, tak aby nie dochodziło do zanurzania przegrody pod wpływem naporu lodu. Dzięki temu można było dobrać odpowiednie liny w przegrodzie lodowej, które nie będą pękać na skutek naporu lodu. Określenie maksymalnej siły naporu lodu na konstrukcje pozwala również zaprojektować właściwe pontony, które nie będą podlegały zanurzeniu i nie będą przepuszczały lodu do jeziora.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

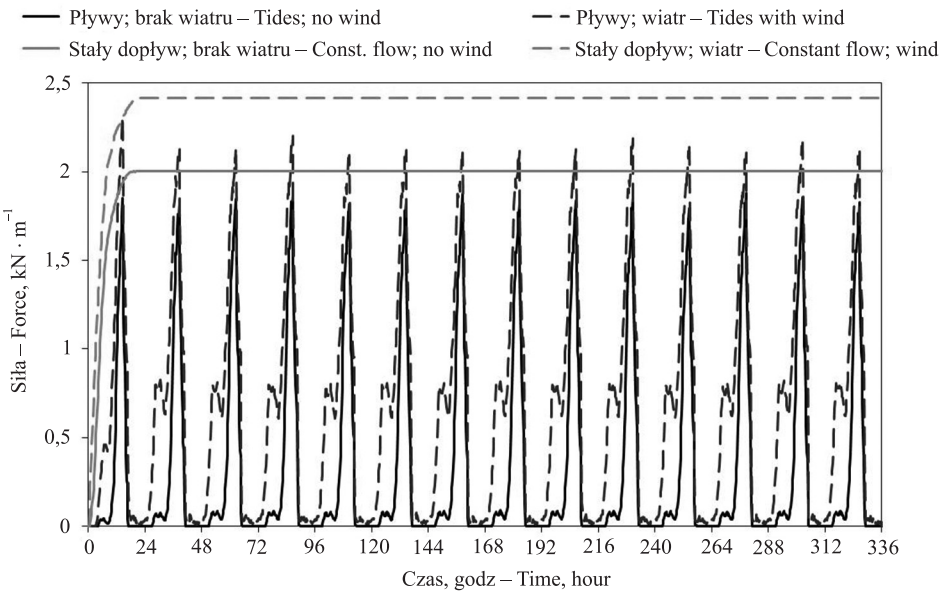


Ryc. 4. Batymetria jeziora Notoro wraz z zaznaczonym obszarem obliczeniowym (b)
Fig. 4. Bathymetry of the Notoro Lake with a model domain (b)

Ruch lodu w rejonie cieśniny łączącej jezioro z morzem odbywa się na skutek działania wiatru północnego oraz zmian położenia zwierciadła wody w morzu wywołanego cyklicznymi pływami. Obliczenia prowadzono zarówno dla stałego dopływu lodu od strony morza (stały przepływ wody $Q = 1200\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ w kierunku jeziora), jak i dla przepływu zmiennego, regulowanego przypływem i odpływem. Dla przypadku przepływu spowodowanego pływami przyjęto, że ich okres jest równy 24 godzinom i ich amplituda jest równa 0,8 m. Ze względu na brak szczegółowych informacji na temat lodu przyjęto dopływ kry od strony morza o grubości $\eta = 0{,}2$ m i koncentracji powierzchniowej $N = 0{,}3$. Przyjęto początkowy wymiar pojedynczej cząstki równy 20 m, co skutkowało wprowadzaniem około 4000 cząstek w rejon nabrzeża, powyżej przegrody lodowej. Szorstkość dolnej powierzchni pokrywy lodowej przyjęto w granicach od $n_{L,\,\min} = 0{,}02$ dla pojedynczej kry lodowej do $n_{L,\,\max} = 0{,}06$ dla zatoru lodowego o większej grubości. W obliczeniach uwzględniono również efekt działania wiatru, który zgodnie z danymi (obserwacje z lat 1999–2004) wieje głównie z kierunku północnego z prędkością dochodzącą do $28{,}7\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Do obliczeń przyjęto najbardziej niekorzystne warunki, tj. wiatr o prędkości $25\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ o kierunku działania od morza w stronę jeziora (12°, gdzie 0° oznacza północ).

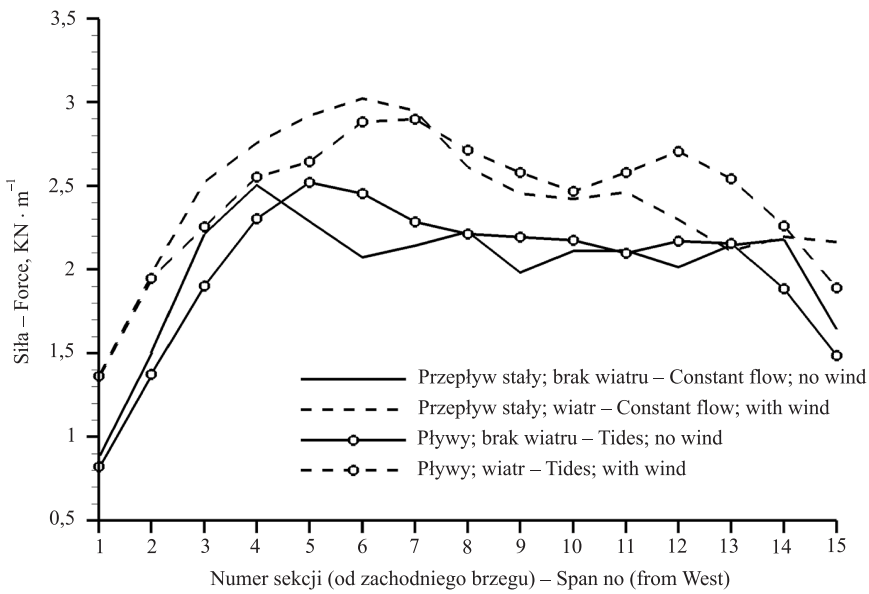
Wyniki obliczeń dostarczyły informacji w postaci zmienności w czasie siły normal-nej działającej na poszczególne przęsła przegrody. Ryc. 5. pokazuje, że średnia siła działająca na przegrodę nie przekracza 2 kN na metr bieżący konstrukcji, a wiatr powoduje zwiększenie tej siły o około 25%. Na kolejnym wykresie (ryc. 6.) pokazano maksymalną siłę, która wytworzyła się wskutek naporu lodu na przegrodę podczas każdej z przeprowadzonych symulacji numerycznych. Można tutaj zauważyć, że z wyjątkiem części zachodniego przęsła przegrody (sekcja 1–4), pływy powodują zwięk-szenie siły naporu w stosunku do przepływu ustalonego.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Ryc. 5. Zmienność w czasie uśrednionej siły normalnej działającej na przegrodę lodową dla wszystkich przypadków obliczeniowych

Fig. 5. Time dependent average normal force action on the in boom for all the simulated cases



Ryc. 6. Maksymalna siła normalna działająca na poszczególne sekcje przegrody (sekcja nr 1 jest przy zachodnim brzegu cieśniny)

Fig. 6. Maximum normal force distributed over the boom length (Span no 1 is on the west shore of the Notoro canal)

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

PODSUMOWANIE

Wykorzystanie wyników modelu matematycznego jest wysoce pożądane w procesie projektowania przegród lodowych. Wielowariantowa symulacja numeryczna pracy takiej budowli w warunkach rzeczywistych może posłużyć zarówno do ustalenia miejsca instalacji przegrody jak i wszelkich parametrów technicznych projektowanej konstrukcji. Prawidłowo zaimplementowany model matematyczny dostarczy przede wszystkim wymiernych danych o obciążeniu przegrody lodem podczas jej eksploatacji. Informacja o wartości maksymalnej siły normalnej działającej na metr bieżący przegrody może zostać wykorzystana w celu prawidłowego doboru wielkości pontonu oraz grubości liny stalowej, na której pontony mają być zainstalowane. Zaprojektowana w ten sposób przegroda będzie znacznie lepiej pracowała i uniknie się niepotrzebnego przewymiarowania konstrukcji. W przypadku zaniechania wykorzystania modelu matematycznego na etapie planowania przegrody lodowej istnieje niebezpieczeństwo, że projekt będzie musiał być realizowany na podstawie wiedzy ogólnej i tak zwanego doświadczenia projektanta, co może prowadzić do błędnego wykonania konstrukcji, która nie spełni swojego zadania. Niestety, istnieje wiele przykładów takiego działania, powodujących w konsekwencji znaczne straty finansowe.

PIŚMIENNICTWO

Alcoa Incorporated (2009). Grasse River T6.75 Ice Control Structure, Basis of Design Report, October.

Ashton, G.D. (1974). Froude criterion for ice block stability, Journal of Glaciology, 68(13), 307–313.

Daly, S.F., Axelson, K.D. (1990). Stability of floating and submerged blocks. Journal of Hydraulic Research, 28(6), 737–752.

Foltyn, E.P., Tuthill, A.M. (1996). Design of Ice Booms. Cold Regions Technical Digest 96(1).

Harbor Technical Research Center for Cold Regions, 2006. Technical Committee Proceedings for Breakwater with Drifted Ice at Notoro Fishery Harbor. Sapporo, Hokkaido, Japan: HTRCCR. [w jęz. japońskim].

Kolerski, T. (2015). Ice cover progression due to flow regulation at the Wloclawek dam. Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus, 14(1), 229–240.

Kolerski, T. (2016). Modeling of ice passage through reservoirs system on the Vistula River, Hy-drodynamic and Mass Transport at Freshwater Aquatic Interfaces, eds. P. Rowiński and A. Marion, GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences, 35–47.

Kolerski, T., Shen, H.T., Kioka, S. (2013). A numerical model study on ice boom in a coastal lake, J. Coastal Res. 29,(6a), 177–186.

Kolerski, T., Shen, H.T., Liu, L. (2008). DynaRICE Modeling to Assess the Performance of an Ice Control Structure on the Lower Grasse River, In: Proc. 19th IAHR Int. Symposium on Ice, 06 – 11 July, 2008, Vancouver, BC, Canada.

Liu, L., Shen, H.T. (2000). Numerical simulation of river ice control with booms (No. ERDC/CRREL-TR-00-10). Engineer Research and Development Center Hanover NH Cold Regions Research and Engineering Lab.

Polak, K., (1990). Przegrody śryżowe na Wiśle. Gosp. Wodn., (4), 91–92.

Polak, K., (2001). Sterowanie przebiegiem zlodzenia na Odrze w profilu Widuchowa, II Warsztaty Lodowe Problemy Rzek, Dobiegniewo.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

PROEKO. (2003). Udrożnienie toru wodnego na Jeziorze Dąbie, Studium wykonalności inwestycji.
Shen, H.T., Lu, S., Crissman, R.D. (1997). Numerical simulation of ice transport over the Lake Erie-Niagara River ice boom. Cold regions science and technology, 26(1), 17–33.
Tuthill, A., Ashton, G., Hendershot, P., Quadrini, J. (2008). Grasse River Ice Control Structure, Physical Model Study. 19th IAHR International Symposium on Ice. Vancouver, British Columbia, Canada.
Tuthill, A.M., Gooch, G. (1998). A physical model study of ice retention booms. 14th IAHR International Symposium on Ice, Potsdam, NY, 61–66.
Tuthill, A. (1995). Structural ice control: Review of existing methods. USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report 95–18.
Uzuner, M.S. (1977). Stability analysis of floating and submerged ice floes. Journal of the Hydraulics Division, 103.

MATHEMATICAL MODELING OF ICE BOOMS

Abstract. Number of technical and non-technical methods has been proposed to prevent ice jams to form on rivers which could be distinguished as active and passive methods. The first group requires human intervention [or power] to be effective during the neutralization of the ice jam event. Icebreakers or other technical equipment is usually used for ice jam operation. The second group typically include ice control structures in a form of piers or floating ice booms and is usually more effective. They generally help to stabilize ice cover by providing anchor points between which the ice spans. Some reduce the average water velocity in stream or river to improve the chances that an ice cover will form. Floating ice booms are installed before the winter season only. The decision to build an ice control structure should be proceeded by detailed theoretical analysis and mathematical modeling. In a paper all threshold parameters for ice ruble stabilization has been provided. Also model application to the real case has been added together with results of the numerical calculations.

Key words: ice booms, mathematical modeling, ice jams, ice dynamics

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 20.12.2016

Do cytowań – For citation: Kolerski, T. (2017). Modelowanie matematyczne przegród lodowych. Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 16(1), 65–76.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl