

Rys. 1. Projektowane połączenie stałe przez Wielki Belt z oznaczeniem miejsca projektowanego tunelu

Belt nie jest w miejscu projektowanego tunelu zbyt głęboki i tylko w niektórych miejscach głębokość mierzona od średniego poziomu morza przekracza 20 m. Głębokości minimalne wynoszą od 15 do 16 m. W tej sytuacji ustawiony poprzecznie do przepływu tunel o wysokości około 4 m wpłynie w sposób istotny na warunki przepływu poniżej tunelu. W sytuacji, gdy wieją silne wiatry wschodnie na skutek spiętrzenia wody w Morzu Bałtyckim przepływa ona górną warstwą przez Wielki Belt w kierunku Morza Północnego. Gęstość wody w Morzu Bałtyckim, którego zasolenie wynosi od 8 do 12 promili jest znacznie mniejsza od gęstości wody w Morzu Północnym, którego zasolenie przekracza 32 promile.

Przedmiotem zainteresowania autorów koncepcji tunelu jest położenie powierzchni rozdziału w przepływie dwuwarstwowym poniżej przeszkody jaką stanowić będzie w przyszłości tunel. Z pewnym przybliżeniem założyć można, że zalegająca poniżej tunelu warstwa silnie zasolonej wody oceanicznej nie posiada własnej dynamiki (woda stojąca) a płynąca w górnej warstwie woda o mniejszej gęstości eroduje powierzchnię rozdziału. Z kolei, silne wiatry zachodnie powodują napływ wody z Morza Północnego, który następuje dolną warstwą. Przedmiotem opisanych dalej badań laboratoryjnych jest pierwsza z w/w sytuacji gęstościowo-dynamicznych. Prace doświadczalne wykonano w laboratorium hydraulicznym Instytutu Hydrodynamiki i Hydrauliki Politechniki w Lyngby (Dania) w czasie stażu naukowego odbywanego tamże w 1986 r. przez autora niniejszej publikacji.

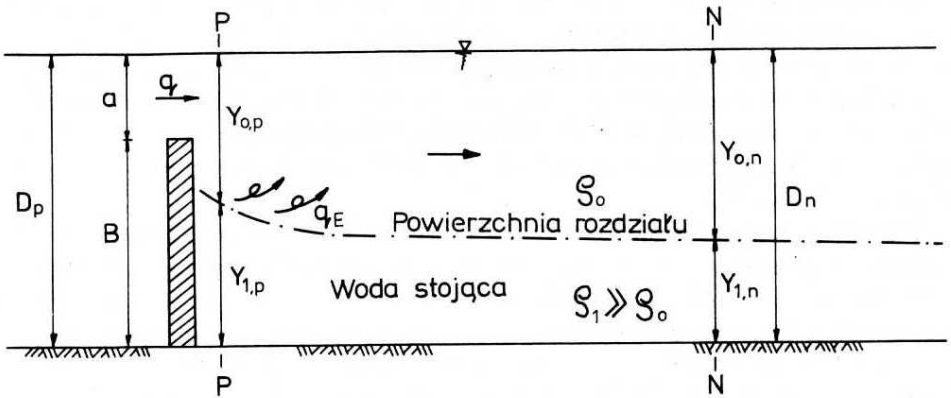
2. Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne wykonano w kanale oszklonym o przekroju prostokątnym posiadającym następujące parametry:

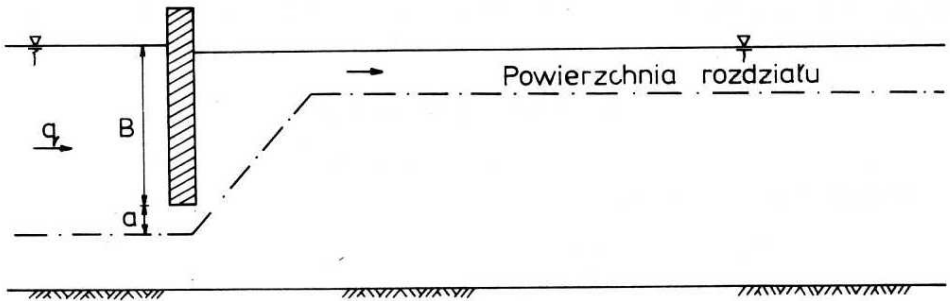
długość	- 2,5 m,
głębokość	- 0,55 m,
szerokość	- 0,15 m.

Odcinek wejściowy (dopływowy) zaprojektowano w ten sposób, aby uniknąć wewnętrzznego odskoku hydraulicznego przed symulującą tunel płytką. Zasadniczym celem badań był pomiar zmian położenia powierzchni rozdziału poniżej prostopadłej do przepływu płytki zmniejszającej przekrój przepływowy kanału. Doświadczenia przeprowadzono dla dwóch sposobów ustawienia płytki tzn. tak, że przepływ odbywał się nad lub pod płytką. Przed przystąpieniem do właściwych pomiarów ustalano głębokość warstwy dolnej, którą stanowiła zasolona i zabarwiona na intensywny kolor czerwony woda. Po czasie niezbędnym do uspokojenia się wody zasolonej doprowadzono wodę słodką o mniejszej gęstości, która płynęła w kanale górną warstwą. Parametry hydrauliczne warstwy górnej, takie jak napięcie przepływu i głębokości, na odcinku dopływowym, były stałe w czasie trwania doświadczenia. Nie zmieniła się również gęstość dopływającej wody dzięki zastosowaniu obiegu otwartego. Odpływającą z kanału wodę o gęstości większej (na skutek pochłaniania wody zasolonej) od gęstości wody dopływającej doprowadzano do kanalizacji. W trakcie doświadczenia nie uzupełniano wyerodowanej miąższości warstwy wody zasolonej.

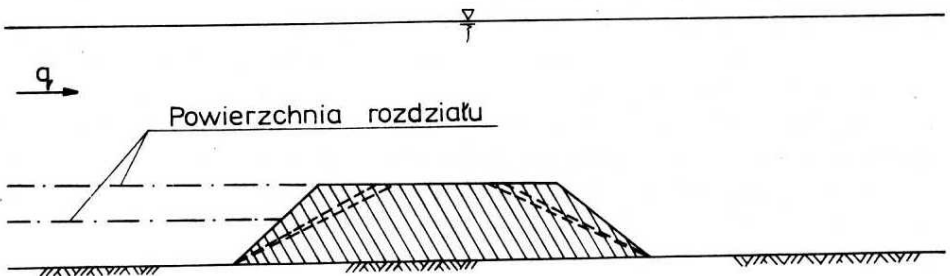
Na rys. 2 pokazano sposób ustawienia płytek w kanale oraz próg dennej z zaokrągloną koroną, który badany był w następnej kolejności. W pracy omówione zostaną



Wariant 1 ustawienia ścianki



Wariant 2 ustawienia ścianki



Wariant 3. Próg.

Rys. 2. Warianty ustawienia ścianki poprzecznej do kierunku przepływu wraz z oznaczeniem parametrów dla wybranego wariantu 1

tylko te doświadczenia, które wykonano dla przepływu wody niezsolonej nad płytką.

Po ustaleniu żądanych parametrów hydraulicznych i gęstościowych mierzono położenie powierzchni rozdziału poniżej płytki. Ze względu na to, że zmiana położenia powierzchni rozdziału następowała bardzo powoli, czas trwania poszczególnych doświadczeń był relatywnie długi i wynosił od 3 do prawie 7 godzin. Ich przebieg rejestrowano na videokasecie odmierając równocześnie czas. Duża różnica gęstości pomiędzy warstwami oraz intensywne zabarwienie w warstwie dolnej pozwoliło na ustalenie z dobrą dokładnością położenia powierzchni rozdziału w poszczególnych fazach doświadczenia. Znacznym ułatwieniem była w tym przypadku możliwość odtworzenia z taśmy całego przebiegu zjawiska lub kolejnych jego faz. Kontrolnie mierzono rozkład gęstości zarówno w stanowisku górnym w przekroju usytuowanym na odcinku początkowym jak i w stanowisku dolnym w pobliżu końca kanału.

Zakres badań omawianego w pracy schematu gęstościowo-dynamicznego (przepływ wody słodkiej po stojącej warstwie wody zasolonej) był dla poszczególnych parametrów następujący: prędkość przepływu nad płytką $v = 4 \div 30$ cm/s, stosunek wysokości płytki do głębokości całkowitej czyli łącznej grubości warstw górnej i dolnej $B/D_p = 0,72 \div 0,94$, względna różnica gęstości $\Delta\rho/\rho_a = 0,012 \div 0,042$ (dalej $\Delta\rho/\rho_a$ oznaczona będzie jako Δ), gęstościowa liczba Froude'a $Fr_\Delta = 0,451 \div 2,916$ czyli $Fr_\Delta^2 = 0,203 \div 8,503$ ($Fr_\Delta = v/\sqrt{g \cdot a \cdot \Delta}$, gdzie a – grubość warstwy wody płynącej mierzona od górnej krawędzi płytki, wartość Fr^2 podano w celu porównawczym, ponieważ w wielu publikacjach gęstościową liczbę Froude'a podaje się w takiej postaci), liczba Reynoldsa $Re = 4600 \div 10000$. Zestawienie parametrów doświadczeń znajduje się w tab. 1.

Tabela 1

Parametry doświadczeń laboratoryjnych

Nr dośw.	Q [l/s]	D_p [m]	$a = D - B$ [m]	$v = Q/ab$ [m/s]	$\Delta = \Delta\rho/\rho_a$	$Fr_\Delta = v/\sqrt{g \cdot a \cdot \Delta}$	Fr_Δ^2
1	0,80	0,38	0,06	0,088	0,0343	0,625	0,390
2	0,80	0,38	0,07	0,076	0,0256	0,574	0,329
3	0,80	0,35	0,04	0,133	0,0256	1,330	1,768
4	0,80	0,33	0,02	0,266	0,0426	2,916	8,503
5	1,32	0,33	0,10	0,088	0,0387	0,451	0,203
6	0,96	0,35	0,04	0,160	0,0365	1,337	1,787
7	0,96	0,35	0,04	0,160	0,0410	1,261	1,590
8	0,80	0,37	0,06	0,088	0,0179	0,865	0,748
9	0,80	0,37	0,06	0,088	0,0175	0,875	0,765
10	0,64	0,37	0,06	0,071	0,0141	0,780	0,608
11	0,80	0,45	0,06	0,088	0,0124	0,915	0,837
12	0,88	0,45	0,06	0,097	0,0160	1,007	1,014
13	0,68	0,45	0,05	0,091	0,0160	1,023	1,046
14	0,76	0,42	0,03	0,168	0,0385	1,586	2,515
15	0,76	0,36	0,05	0,101	0,0935	0,727	0,528
16	0,96	0,36	0,05	0,128	0,0390	0,925	0,855

Jak już wspomniano, badania dotyczyły jednej z koncepcji połączenia wysp Zelandii i Fionii, jednakże nie należy ich utożsamiać z badaniami modelowymi. Przy założeniu, że wysokość posadowionego na dnie morskim prefabrykowanego elementu tunelu wynosi 5 m, a głębokość całkowita 15 m, otrzymamy relację wysokości przeszkody do głębokości całkowitej równą 0,33. W prezentowanych badaniach celowo przyjęto większe wartości B/D_p , a tym samym znacznie większe zmniejszenie przekroju przepływowego, niż to będzie miało miejsce w naturze, ponieważ pozwoliło to bardziej wyraziście określić wpływ przeszkody na warunki przepływu stratyfikowanego poniżej tej przeszkody. Dziewięć doświadczeń wykonano, gdy przepływ poniżej przegrody był podkrytyczny ($Fr_\Delta < 1$) a pozostałe dla przepływu nadkrytycznego. Wyniki doświadczeń omówione zostaną w dalszej części pracy.

3. Położenie powierzchni rozdziału poniżej ścianki zmniejszającej przekrój przepływowy

Wszystkie zastosowane oznaczenia przyjęte do wyznaczenia zmian położenia powierzchni rozdziału poniżej ścianki na skutek erozji warstwy dolnej pokazano na rys. 2 (wariant 1). Przy wyprowadzeniu wzoru na zmianę położenia rozdziału przyjęto następujące parametry:

bezwymiarowa głębokość warstwy dolnej w przekroju	$N/y_n = Y_{1,n}/y_{cr}$
bezwymiarowa głębokość warstwy dolnej w przekroju	$P/y_p = Y_{1,p}/y_{cr}$
bezwymiarowa głębokość całkowita przed progiem	$d_n = D_n/y_{cr}$
bezwymiarowa wysokość ścianki	$b = B/y_{cr}$
natężenie przepływu na jednostkę szerokości	$q = Q/w$
skala czasu	$T = aL/q$
bezwymiarowa głębokość nad progiem	$a^* = a/y_{cr}$
bezwzględny czas doświadczenia	$t^* = t/T$
bezwymiarowa strata energii	$h' = H/\Delta \cdot y_{cr}$
natężenie przepływu porywanej wody zasolonej	Q_E
względna różnica gęstości	$\Delta = \Delta_p/\rho_a$
skala długości	$y_{cr} = (q^2/\Delta \cdot g)^{1/3}$
współczynnik nierównomierności rozkładu energii	α
współczynnik nierównomierności rozkładu pędu	β
współczynnik przewężenia przekroju	$\Psi = 0,6$

Równanie energii dla warstwy dolnej

$$D_p + \Delta \cdot Y_{1,p} = D_n + \Delta \cdot Y_{1,n} \quad (1)$$

$$D_p - D_n = \Delta \cdot (Y_{1,n} - Y_{1,p}) \quad (2)$$

Ze względu na to, że warstwa dolna jest stojąca, nie uwzględniamy w równaniu poziomego gradientu ciśnienia. Równanie (2) po doprowadzeniu do postaci bezwymiarowej ma postać

$$d_p - d_n = \Delta(y_n - y_p) \quad (3)$$

Równanie pędu dla obu warstw pomiędzy przekrojami P i N :

$$P_p - P_N = \frac{Q \cdot \gamma}{g} (\beta_n V_n - \beta_p V_p) + \sum F \quad (4)$$

gdzie: F – siły zewnętrzne; przyjęto, że $\sum F = 0$.

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma b (D_p^2 + \Delta \cdot Y_{1,p}^2) \quad (5)$$

$$P_N = \frac{1}{2} \gamma b (D_n^2 + \Delta \cdot Y_{1,n}^2) \quad (6)$$

$$\frac{Q \cdot \gamma}{g} \beta_n V_n = \frac{\gamma q^2 b \beta_n}{g Y_{0,n}} \quad (7)$$

ponieważ $q = Q/b$ oraz $V_n = Q/A_n = q/Y_{0,n}$

$$\frac{Q \cdot \gamma}{g} \beta_p \cdot V_p = \frac{\gamma q^2 b \beta_p}{g a \cdot \Psi} \quad (8)$$

ponieważ $V_p = Q/A_p \cdot \Psi = q/a \cdot \Psi$

Po podstawieniu zależności (5), (6), (7) i (8) do wzoru (4) i podzieleniu obu stron równania przez $\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot b \cdot \Delta$ oraz wyrażeniu a jako $D_p - B$ i $(q^2/g\Delta)^{1/3}$ jako y_{cr} otrzymujemy

$$\frac{1}{\Delta} (D_p^2 - D_n^2) + Y_{1,p}^2 - Y_{1,n}^2 + 2y_{cr}^3 \left(\frac{\beta_p}{a \cdot \Psi} - \frac{\beta_n}{Y_{0,n}} \right) \quad (9)$$

Wyrażenie $\frac{1}{\Delta} (D_p^2 - D_n^2) + Y_{1,p}^2 - Y_{1,n}^2$ po podstawieniu za $D_p - D_n = \Delta(Y_{1,n} - Y_{1,p})$ z równania energii dla warstwy dolnej oraz po zastosowaniu przybliżenia, że $D_p = D_n$ ma postać $(Y_{1,p} - Y_{1,n})(Y_{1,p} + Y_{1,n} - 2D_n)$. Postać tą wykorzystano w równaniu (9) i doprowadzono je do formy bezwymiarowej. Po wymnożeniu i uszeregowaniu wyrażeń otrzymujemy

$$y_p^2 - 2d_n y_p + \left[2d_n \cdot y_n - y_n^2 + 2 \left(\frac{\beta_p}{\Psi \cdot a^*} - \frac{\beta_n}{(d_n - y_n)} \right) \right] = 0 \quad (10)$$

Po podstawieniu za wyrażenie w nawiasie kwadratowym symbolu c otrzymujemy równanie kwadratowe, którego jedno z rozwiązań ma postać

$$y_p = d_n - \sqrt{d_n^2 - c} \quad (11)$$

Równanie (11) wyraża zależność pomiędzy głębokością warstwy dolnej w przekroju P y_p i głębokością y_n tejże warstwy w przekroju N .

Równanie energii pomiędzy przekrojami P i N

$$D_p + \frac{\alpha_p \cdot V_p^2}{2g} = D_n + \frac{\alpha_n \cdot V_n^2}{2g} + H \quad (12)$$

gdzie: H – straty energii.

Zdefiniowane poprzednio $V_p = q/\Psi \cdot a$, $V_n = q/Y_{0,n} = q(D_n - Y_{1,n})$, $\alpha_p = 1$ oraz $D_p - D_n = \Delta(Y_{1,n} - Y_{1,p})$ podstawiamy do równania (12) otrzymując następującą zależność

$$H = \Delta(Y_{1,n} - Y_{1,p}) + \frac{q^2}{2g} \left[\frac{\alpha_p}{(\Psi \cdot a^*)^2} - \frac{\alpha_n}{(D_n - Y_{1,n})^2} \right] \quad (13)$$

W celu doprowadzenia równania energii do postaci bezwymiarowej należy podzielić obie jego strony przez $\Delta \cdot y_{cr}$

$$h' = y_n - y_p + \frac{1}{2} \left[\frac{\alpha_p}{(\Psi \cdot a^*)^2} - \frac{\alpha_n}{(d_n - y_n)^2} \right] \quad (14)$$

Wartość h' wyrażono jako zależną od y_n , ponieważ y_p jest również (rów. 11) określone przez y_n . Współczynnik nierównomierności rozkładu energii α oraz pędu β obliczono dla każdego z doświadczeń w zależności od grubości warstwy wody płynącej do głębokości całkowitej.

Warunki stabilności przepływu stratyfikowanego są określone przez lokalną liczbę Richardsona. F. Bo Pedersen (1980) wprowadził tzw. "Bulk-Flux Richardson Number", która określa relację zysku energii potencjalnej (POT) oraz turbulენტnej energii kinetycznej (KIN) porywanej masy wody do produkcji niezbędnej do zmiany turbulენტnej energii kinetycznej $R_{iF} = \frac{POT+KIN}{PROD}$. Zakłada on, że wartość R_{iF} jest dla określonego typu przepływu stała i wynosi 0,045 dla przepływów podkrytycznych ($Fr_\Delta < Fr_{\Delta,cr}$) oraz 0,18 dla przepływów nadkrytycznych ($Fr_\Delta > Fr_{\Delta,cr}$). W rozpatrywanym przypadku zmiana (zysk) energii potencjalnej następuje na skutek pochłaniania wody zasolonej przez płynącą górną warstwę. Nie uwzględniono członu KIN (turbulენტnej energii kinetycznej) do wyznaczenia R_{iF} z dwóch powodów: po pierwsze, ponieważ poziom turbulencji jest niski dla rozpatrywanych zakresów gęstościowej liczby Froude'a ($0,451 < Fr_\Delta < 2,916$) i po drugie, turbulენტna energia kinetyczna stanowi zaledwie kilka procent całkowitej energii kinetycznej przepływu (F. Bo Pedersen 1980). Człon PROD w przeprowadzonych doświadczeniach określić można jako iloczyn natężenia przepływu w warstwie górnej i strat energii na odcinku pomiędzy przekrojami P i N . Zapis matematyczny poszczególnych członów R_{iF} wygląda następująco:

$$POT = \frac{1}{2} \cdot Y_{0,n} \cdot \Delta \cdot g \cdot \rho \cdot Q_E \quad (15)$$

gdzie: Q_E – natężenie przepływu porywanej wody zasolonej

$$PROD = \gamma \cdot Q \cdot H = g \cdot \rho \cdot Q \cdot H \quad (16)$$

gdzie: Q – natężenie przepływu w warstwie górnej

$$R_{iF} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Y_{0,n} \Delta}{H} \cdot \frac{Q_E}{Q} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d_n - y_n}{h'} \cdot \frac{Q_E}{Q} \quad (17)$$

Z równania ciągłości wody zasolonej wyznaczamy relację Q_E/Q

$$Q_E = \frac{d}{dt}(w \cdot L \cdot Y_{1,n}) \quad (18)$$

gdzie:

$w \cdot L \cdot Y_{1,n}$ – objętość wody zasolonej w kanale,

L – długość kanału liczona w kierunku wody dolnej od ścianki zmniejszającej przekrój przepływowy.

Przy założeniu, że woda zasolona jest pochłaniana równomiernie na całej długości kanału oraz podstawieniu, że $q = Q/w$ relacja Q_E/Q przyjmuje postać

$$Q_E/Q = L \cdot w/Q \cdot \frac{dY_{1,n}}{dt} = \frac{L}{q} \cdot \frac{dY_{1,n}}{dt} \quad (19)$$

a po zastosowaniu kolejnych podstawień, otrzymujemy

$$Y_{1,n} = y_{cr} \cdot y_n, \quad t = \tau \cdot t^*, \quad \tau = a \cdot L/q$$

$$Q_E/Q = \frac{L}{q} \left(\frac{y_{cr} \cdot q}{a \cdot L} \cdot \frac{dy_n}{dt^*} \right) = \frac{1}{a^*} \cdot \frac{dy_n}{dt^*} \quad (20)$$

gdzie: $a^* = a/y_{cr}$

Zdefiniowaną równaniem (20) relację Q_E/Q podstawiamy do równania (17) otrzymując ostatecznie

$$R_{iF} = \frac{(d_n - y_n)}{2a^*h'} \cdot \frac{dy_n}{dt^*} \quad (21)$$

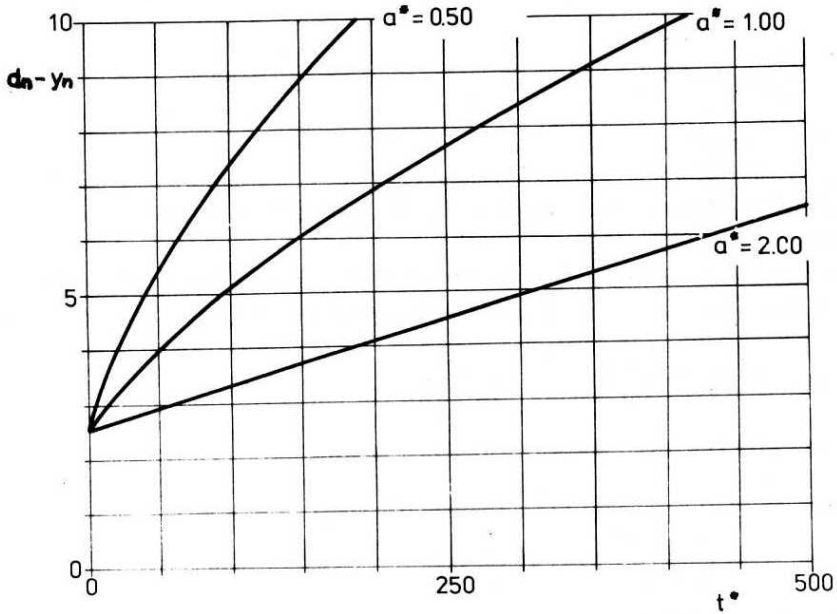
Z równania tego wyznaczyć możemy dla określonego typu przepływu czas niezbędny do zmiany położenia powierzchni rozdziału poniżej ścianki z pozycji początkowej do pozycji końcowej

$$t^* = \frac{1}{R_{iF}} \int_{y_n(t^*=0)}^{y_n(t^*)} [(d_n - y_n)/(2a^*h')] dy_n \quad (22)$$

Ze względu na bardzo skomplikowaną postać h' całkę rozwiązano numerycznie dla różnych parametrów wziętych z doświadczeń laboratoryjnych w celu porównania obliczonego za pomocą wzoru (22) czasu z pomierzonym w laboratorium. Do obliczeń przyjęto następujące stałe wartości liczbowe: $R_{iF} = 0,045$ gdy $Fr_\Delta < 1$, $R_{iF} = 0,18$ gdy $Fr_\Delta > 1$, i współczynniki $\Psi = 0,6$ oraz $\alpha_n = 1,1$.

W tabeli 2 zestawiono czas obliczony i wynikający z badań laboratoryjnych (podany w sekundach) potrzebny do zmiany położenia powierzchni rozdziału oznaczonej jako $d_n - y_n(t^* = 0)$ i $d_n - y_n(t^*)$. Wyniki obliczeń i badań laboratoryjnych pokazano również na rys. 3 i 4.

Na rysunku 3 przedstawiono zależność $(d_n - y_n)$ od t^* dla różnych wartości a^* , gdzie a^* jest głębokością wody nad progiem podaną jako parametr bezwymiarowy. Są to wyniki obliczeniowe. Najszybciej wartość $(d_n - y_n)$ zwiększa się przy $a^* = 0,50$, co oznacza, że najgwałtowniejsza erozja warstwy dolnej poprzez przyłączenie jej do płynącej warstwy górnej następuje przy najmniejszej z rozważanych głębokości wody nad

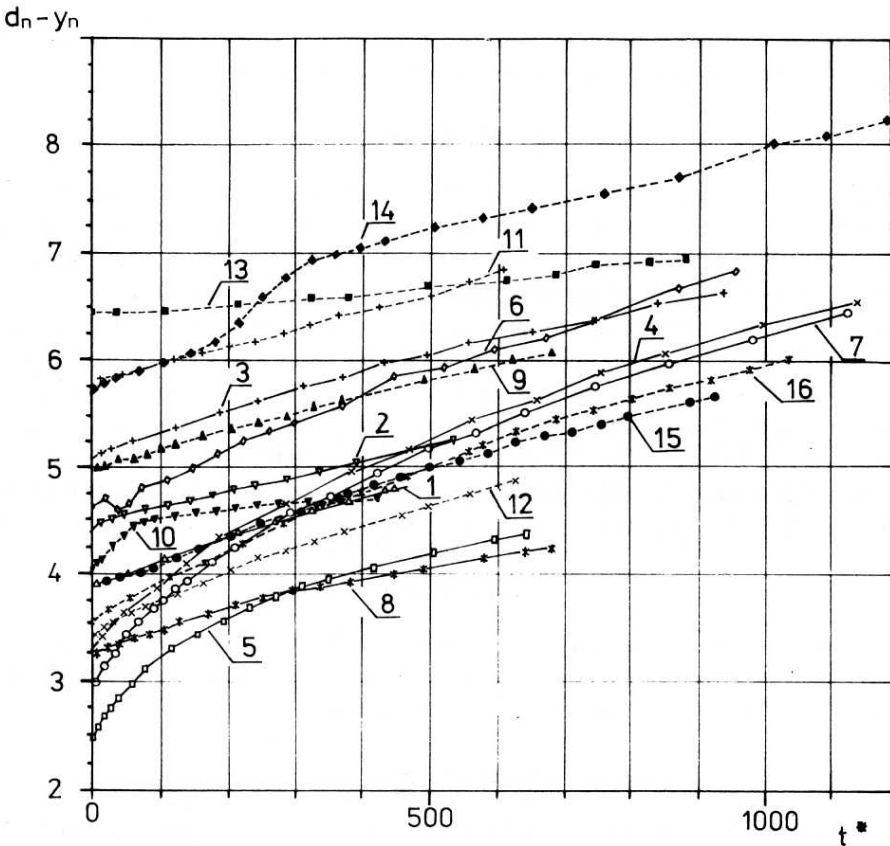


Rys. 3. Zmiana położenia powierzchni rozdziału ($d_n - y_n$) obliczona dla różnych wartości a^*

Tabela 2

Zmiana położenia powierzchni rozdziału

Nr dośw.	d_n	$d_n - y_n$ $t^* = 0$	$d_n - y_n$ t^*	a^*	Fr_{Δ}	t_{obs}^*	t_{obs} [sec]	t_{obl} [sec]
1	9,5	3,87	4,80	1,48	0,625	475	13367	14100
2	7,6	4,38	5,25	1,51	0,574	535	17565	17822
3	7,0	5,07	6,61	0,79	1,330	937	17579	18900
4	8,25	3,28	6,50	0,61	2,916	1150	10787	10981
5	5,5	2,48	4,31	1,70	0,451	645	18323	18022
6	7,0	4,62	6,82	0,78	1,337	961	15015	17009
7	7,0	2,98	6,37	0,86	1,261	1125	17578	19205
8	7,4	3,27	4,19	1,03	0,865	675	18996	17427
9	7,4	5,00	6,06	1,06	0,875	678	19080	18538
10	7,4	4,03	4,63	1,22	0,780	370	13028	12331
11	7,5	5,85	6,79	0,94	0,915	610	17167	13005
12	7,5	3,37	4,90	1,01	1,007	625	15998	18300
13	9,0	6,44	6,90	1,06	1,023	875	24144	26097
14	10,5	5,74	8,20	0,74	1,586	1200	23715	24001
15	9,0	3,86	5,61	1,29	0,727	925	18280	19002
16	7,2	3,56	6,00	1,01	0,925	1025	20019	18227



Rys. 4. Zmiana położenia powierzchni rozdziału ($d_n - y_n$) w czasie t^* zaobserwowana w badaniach laboratoryjnych w doświadczeniach nr 1÷16

progiem przepływającej z największą prędkością. Wartość ($d_n - y_n$) wzrasta od 2,5 do 10 w czasie t^* wynoszącym 185. Najwolniej natomiast erozja warstwy dolnej następuje, gdy $a^* = 2,0$ (maksymalne z badanych) gdyż wówczas przyrost miąższości warstwy górnej oznaczonej na rys. 3 jako ($d_n - y_n$) od 2,5 do 6,5 następuje w czasie t^* równym 500. Badania laboratoryjne w całej rozciągłości potwierdziły te tendencje. Na rys. 4 pokazano zmianę położenia powierzchni rozdziału w czasie t^* we wszystkich 16 doświadczeniach. Do obliczeń czasu t^* przy zastosowaniu wzoru (22) brano takie same wartości ($d_n - y_n$). Obliczone i zaobserwowane wartości t (tab. 2) wskazują na stosunkowo dobrą zgodność w tych doświadczeniach, w których przepływ był wyraźnie podkrytyczny ($Fr_\Delta < 1$) lub nadkrytyczny ($Fr_\Delta > 1$) oraz na znaczne rozbieżności w doświadczeniach, w których Fr_Δ zbliżone było do jedności ($Fr_\Delta = 1$, przepływ krytyczny). Do obliczeń brano konsekwentnie $R_{iF} = 0,045$ dla $Fr_\Delta < 1$ oraz $R_{iF} = 0,18$ dla $Fr_\Delta > 1$ stosując tę zasadę również dla tych doświadczeń, w których Fr_Δ było nieznacznie większe lub nieznacznie mniejsze od jedności czyli dla doświadczeń nr 3 ($Fr_\Delta = 1,33$), 6 (1,337), 7 (1,261), 11 (0,915), 12 (1,007), 13 (1,023) oraz 16 (0,925).

W tych właśnie doświadczeniach rozbieżności pomiędzy t^* zaobserwowanym i obliczonym są największe. W tab. 2 porównano wartości t w sekundach.

4. Wnioski

Przedstawione wyniki badań laboratoryjnych zmian położenia powierzchni rozdziału poniżej ścianki ustawionej poprzecznie do przepływu porównano z wynikami obliczeń numerycznych. Opisaną metodę obliczeniową, która pozwala na określenie czasu niezbędnego do zmiany położenia powierzchni rozdziału uznać można za wystarczająco dokładną dla przepływów wyraźnie podkrytycznych lub nadkrytycznych oraz o zdecydowanie mniejszej dokładności dla przepływów krytycznych $Fr_{\Delta} = 1$ lub $Fr_{\Delta} \approx 1$. Wyniki obliczeń porównano z wynikami badań laboratoryjnych. Chociaż brak jest jakichkolwiek wyników dla warunków naturalnych powyższy wniosek można odnieść również dla warunków naturalnych, ale tylko w przypadku analogicznej sytuacji gęstościowo-dynamicznej i braku dodatkowych efektów powstałych w wyniku falowania, ruchu statków lub niejednorodności gęstościowej w obrębie poszczególnych warstw.

Literatura

F. Bo Pedersen, *A monograph on turbulent entrainment and friction in two-layer stratified flow*, Series Paper 25, Institute of Hydrodynamics and Hydraulics Engineering, Technical University of Denmark, 1980.

Summary

The results of the laboratory experiments of the interface erosion caused by flowing fresh water on the stagnant layer of salted water are presented in the paper. Observations of the interface variations allowed us to determine the dynamics of considered phenomena for different flow regimes (subcritical, supercritical). The method for calculations is given in the paper. Experimental data were used for calculations of the interface variations due to time. The assumptions which were undertaken in calculations are well confirmed by the experimental results. The method for interface variations calculations can be used for some cases in practice.

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych erozji powierzchni rozdziału powodowanej przez przepływ wody słodkiej na warstwie stojącej wody silnie zasolonej. Obserwacja powierzchni rozdziału pozwoliła na określenie dynamiki jej zmian dla różnych reżimów przepływu (podkrytyczny, nadkrytyczny). Zaproponowano również metodę obliczeniową, którą zastosowano do obliczeń czasu zmiany położenia powierzchni rozdziału dla danych z badań laboratoryjnych. Porównano wyniki eksperymentalne z obliczonymi, które potwierdzają słuszność przyjętych w metodzie obliczeniowej założeń. Opracowana metoda obliczeniowa może być zastosowana w praktyce.