

odskoku i to będzie punktu odskoku. Całe to obniżenie zwierciadła wody jest zwykle wypełnione wodą płynącą w wirach poziomych w odwrotnym kierunku. Skutkiem wzmożonej prędkości i wirów cała ta przestrzeń jest niebezpieczna dla rzeki i filarów, dlatego też przy obliczaniu światła mostu należy kierować się tem że spiętrzenie winno być takie, aby poniżej mostu nie wytworzył się ruch podkrytyczny.

#### Przepusty.

Przepusty obliczać należy tak, jak kanały, a o ile działają pod ciśnieniem, to tak jak rury. Nadto należy tu uwzględnić stratę spadku przy wlocie wskutek mającego zwykle miejsce zwężenia przekroju. Wogóle można tu stosować te same obliczenia co dla szluzy wpustowej.

#### Uderzenie wodne.

Jeżeli zamykamy przewód działający pod ciśnieniem to następuje zwiększenie tego ostatniego; woda płynąca w przewodzie z prędkością  $u$  posiada energję kinetyczną:

$$E = \frac{\gamma \cdot l \cdot F \cdot u^2}{2g} ; \frac{\gamma \cdot l \cdot F}{2g} \text{ jest to masa}$$

Jeżeli zamykanie trwa  $T$  sekund, to w tym czasie zmieni się będzie ciśnienie, co spowoduje nadwyżkę

prędkości.

$$F \cdot \int p dt = \int m du$$

$F \cdot \int p dt$  jest to praca ciśnienia,  $\int m du$  - praca siły bezwładności. Według Budan'a ciśnienie zmienia się wraz z czasem według paraboli, tak, że

$$\frac{P-p}{P} = \left[ \frac{T-t}{T} \right]^2 \quad \text{przyczem } P \text{ jest to najwyższe ciśnienie występujące po upływie } T \text{ sek.}$$

$$\text{a zatem } p = \frac{P}{T^2} [T^2 - (T-t)^2]$$

$$\text{czyli } \frac{FP}{T^2} \int (2Tt - t^2) dt = mu$$

$$P = \frac{3}{2} \frac{mu}{T \cdot F} = \frac{3 \cdot l F u}{2 g T \cdot F}$$

Wyrażając ciśnienie w wysokości słupa cieczy, otrzymamy

$$\gamma(h) = p = \frac{3}{2} \cdot \frac{l u}{g T}$$


Jeżeli przy końcu ciągu ustawimy rurę pionową to woda po zamknięciu, nie ułoży się w niej tak, jak pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego, podniesie się o wysokość  $h$ . Jeżeli woda straciła całą swą energię kinetyczną, to ta ostatnia musiała pójść właśnie na podniesienie wody w rurze pionowej o wysokość  $(h)$ , czyli,

$$\frac{F l \gamma u^2}{2g} = f \cdot (h) \cdot \gamma \cdot \frac{(h)}{2}$$


$$\text{ale } u^2 = 2gh, \text{ przeto } F \cdot l \cdot h = f \cdot \frac{(h)^2}{2}$$

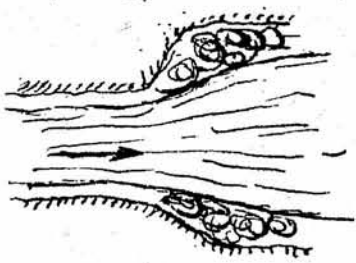
$$(h) = \sqrt{2 l h \cdot \frac{F}{f}};$$

### Ruch wirowy.

Jest to zjawisko bardzo często spotykane. Tworzenie się wirów można zaobserwować przy wszelkich przeszkodach w korycie rzeki, a zwłaszcza za nie-  
mi, jak to ma miejsce przy filarach, tamach i t.p. (rys )

Następnie przy nagłych rozszerzeniach koryta (rys ) na łukach woda ulega odbiciu i spotykając się nas-

tępnie z innemi strugami, również tworzy wiry ( rys ) Wiry występują również wtedy, gdy dwa koryta łączą się w jedno i naogół zawsze tam, gdzie spotykają się strugi wody mające różne kierunki. Wiry utrudniają wszelkie pomiary i choć znamy sposób ich powstawania i prawa ich ruchu z hydrauliki, to jednak praktycznie stosować tych wiadomości nie potrafimy wobec różnorodności i niestałości zjawisk. Dlatego też we wszystkich naszych obliczeniach wpływ tego ruchu zawarty był we współczynnikach i t.p.



### Ruch falowy.

Ruch falowy charakteryzuje zjawisko, że cząsteczki cieczy podlegającej mu nie poruszają się w kierunku

ku poziomym, tylko energia udzielona jednemu cząsteczkom udziela się innym i powoduje ruch umiejscowiony wywołując wrażenie ruchu postępowego. Jako dowód tego służyć może to zjawisko, że różne przedmioty, pływające w cieczy podlegającej ruchowi falowemu, nie zmieniając swego położenia.

Rozróżnić należy dwa rodzaje ruchu falowego:

1. Fale wędrujące (przenoszące się, Ondes de translation, Uebertragungswellen) z szczególnym rodzajem fali piętrzenia (samotnej, Onde solitaire) powstającej wskutek bodźca działającego w kierunku poziomym, np. statku, tłoka i t.p.

2. Fale periodyczne, o ruchu wahadłowym (Ondes d'oscillation, Schwingungswellen), występuje naprzemian w kierunku dodatnim i ujemnym w stosunku do poziomu wody.

#### Fale wędrujące.

Gdy w pewnym kanale poruszać będziemy ścianę szczelną przylegającą do dna i skarp, to wtedy powstanie spiętrzenie. Spiętrzenie to przenosić się może z prędkością naogół nieróżniącą się od prędkości poruszającej się ściany. Rozpatrując równowagę cieczy w dwóch kolejnych położeniach fal, dojść możemy do następującego wzoru na prędkość przenoszenia się fali:

$$V = \sqrt{g \left( \frac{F}{1} + \frac{3}{2} h + \frac{1 h^2}{2 F} \right)}$$

gdzie  $F$  jest to powierzchnia przekroju kanału,  $l$  jest szerokość,  $h$  - wysokość spiętrzenia. Biorąc pod uwagę kanał prostokątny i opuszczając ostatni wyraz w nawiasie pod pierwiastkiem, otrzymamy

$$V = \sqrt{g \left( H + \frac{3}{2} h \right)};$$

gdzie  $H$  jest głębokością kanału, a jeżeli jeszcze założymy, że  $H$  jest bardzo wielkie w stosunku do  $h$ , co występuje w morzach, to otrzymamy wzór uproszczony

$$V = \sqrt{gH};$$

Scott Russel doświadczalnie wyprowadził wzór:

$$V = \sqrt{g(H + h)}$$

mało różniący się od poprzedniego.

Wzory powyższe są tylko przybliżone, i ile chcemy je stosować nie do kanałów zamkniętych szczelną ścianą, ale np. do fali wywołanej ruchem statku w kanale, lub fali morskiej.

Boussinesque wyprowadza z ogólnych praw ruchu wzór dla fali o dowolnym kształcie:

$$V = \sqrt{gH} \left( 1 + \frac{3}{4} \frac{h}{H} + \frac{H^2}{6h} \frac{dh}{dx} \right)$$

Tutaj więc prędkość  $V$  jest funkcją  $h$  od krzywizny fali. Z wzoru tego wynika, że zależnie od krzywizny

różne punkty mają różną prędkość przenoszenia się fali.

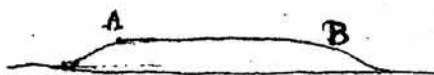
Gdy  $h$  w stosunku do  $H$  jest nieznaczne, a fale bardzo płaskie ( morze ) to iz tego wzoru otrzymamy

$$V = \sqrt{gH}$$

a zatem ten przybliżony wzór stosować można do fal bez względu na ich kształt.

Jezeli pod wpływem jakiegoś bodźca powstanie większa płaska fala ( rys )

to prędkość przenoszenia się



jej między punktami A i B jest stała, bo tam  $\frac{d^2h}{dx^2} = 0$  natomiast w punktach A i B prędkość będzie zmienna malejąca w p. A bo tam krzywizna jest ujemna, a rosnąca w p. B i w tych punktach fala dąży do podziału i wytworzenia różnych fal. Z tego powodu fala rzadko przenosi się w swym kształcie pierwotnym lecz zwykle dzieli się na szereg fal pochodnych.

Wśród fal różnego kształtu można znaleźć takie, że wysokość ich  $h$  i krzywizna  $\frac{d^2h}{dx^2}$  są tak dobrane, że prędkość przenoszenia się  $v$  będzie jednakowa dla każdego punktu fali, wtedy ta fala nie zmieni swego kształtu i jako pojedyncza fala samotna posuwa się dalej.

Jezeli woda, w której rozchodzą się fale znajduje się w ruchu regularnym o średniej prędkości  $u$ , to

rzeczywista prędkość przenoszenia się fal

$$v = U \pm \sqrt{gH} \left( 1 + \frac{3}{4} \frac{h}{H} \right)$$

a przy dużej głębokości  $H$ ,  $v = u \pm \sqrt{gH}$  ;

### Fale perjodyczne.

Odróżniamy fale, które robią wrażenie ruchu po powierzchni wody i takie, które wyraźnie wykazują tylko podnoszenie się i opadanie zwierciadła.

Teoretyczne rozważania Geistnera o możliwości utrzymania się wolnej powierzchni w kształcie fal doprowadzają do matematycznego określenia tej powierzchni. Każda cząstka znajduje się na pewnej tarczy, na obwodzie lub wewnątrz, a tarcza znajduje się w ruchu obrotowym dookoła pewnego punktu. Jednocześnie zaś porusza się ona ruchem postępowym.

W ten sposób ruch odbywa się po trochoidzie, cykloidzie, lub sinusoidzie, zależnie od stosunku zachodzącego między długością fali i wysokością spiętrzenia.

Z rozważań teoretycznych wynika, że

$$v = \frac{gL}{T} ; L = \frac{gT^2}{2} ; T = \sqrt{\frac{2L}{g}} ; v = \sqrt{\frac{gL}{2}} ;$$

$L$  - długość fali ,  $T$  - jej okres.

Takie fale powstają na wodzie bieżącej, bo wtedy rzeczywiście środek obrotu posuwa się ruchem postępowym. Możemy sobie teraz wyobrazić, że cała masa wody porusza się z pewną prędkością w  $-v$  czyli równą prędkości środka obrotu lecz ze znakiem przeciwnym. Wtedy środki ruchu kolistego pozostają w spoczynku, a cząstki odbywają tylko ruch kołisty. Ten wypadek występuje w falach na wodzie stojącej. Ruch przenośny jest tylko pozorny, cząstki okręcają się w miejscu tworząc raz wzniesienia, to znów obniżenia. Z teorii Geistnera wypływają następujące związki:

$$L = 2\pi R = \frac{gT^2}{2} = \frac{2\pi}{g} v^2 = 0,064 \cdot v^2 \text{ bo } \text{pozorna prędkość fali } v = \frac{L}{T} = \frac{2\pi R}{T}$$

$$\text{prędkość obrotowa } u = \frac{2\pi r_0}{T}$$

przy czym  $r_0$  jest to promień drogi cząstki na pow. w głębi

$$\text{oraz } \frac{v}{u} = \frac{r}{r_0} = \frac{L}{8\pi h} \text{ gdzie } h \text{ jest to amplituda fali.}$$

Teoria Geistnera wyprowadzona została dla głębokości nieskończonej wielkich, przy głębokościach skończonych, można ją jednak również stosować, przyjmując zamiast ruchu kolistego cząsteczek, ruch po elipsie. Zauważyć należy, że ruch falowy odbywa się nie tylko na powierzchni wody, występuje on również i w głębi, a między temi ruchami musi zachodzić pewien zwią-

zek; badania tego związku doprowadziły do wzoru:

$$r = h.e^{-\frac{\pi z}{L}}$$

$r$  oznacza tu promień koła opisywanego przez cząstkę znajdującą się na głębokości  $z$ ,  $h$  jest promieniem koła opisanego przez cząstkę znajdującą się na powierzchni, zatem  $2h$  będzie amplitudą fali. Mając na uwadze ostatni wzór i poprzednie, wynikające z teorii Geistnera, łatwo określimy ruch w dowolnym punkcie wody, znając ruch na powierzchni.

Wracając do fal, powstałych na głębokości skończonej, podamy wzory na osi wspomnianych ełips:

$$a = R \frac{\cos(2\pi \frac{H-z}{L})}{\sin \frac{2\pi H}{L}} ; \quad b = R \frac{\sin(2\pi \frac{H-z}{L})}{\sin \frac{2\pi H}{L}}$$

na powierzchni:  $a = R \operatorname{ctg} \frac{2\pi H}{L}$  ;  $b = R$  ;

Zmiana głębokości powoduje zmianę w kształcie fal; przy większej głębokości energia rozprasza się na większą masę wody, a zatem amplituda fal musi być mniejsza, jak również i prędkość ruchu cząsteczek. Gdy głębokość maleje, zwiększa się am-

plituda, prędkość ruchu cząstek, a jednocześnie, skutkiem zwiększonego tarcia o dno, zmniejsza się długość fali; z chwilą, gdy  $L = 2R$ , linja falista staje się cykloidą i fala dalszym zmianom podlegać już nie może, ruch wirowy ustaje, fala ulega rozbiciu, znika zatem pionowa składowa ruchu;

Niektóre fale dochodzą jednak do samego brzegu, i wtedy masa wody wyrzucona na brzeg powraca w postaci fali wstecznej, która spotkawszy nadbiegającą nową falę, rozбивa ją przedwcześnie.

Według Hagena fala załamuje się gdy głębokość wody jest mniejsza od wysokości fali. Według

Gaillarda następuje to wtedy, kiedy  $\frac{H}{h} = 1,67$ .

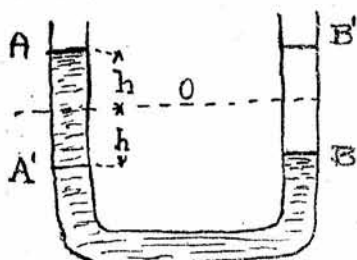
Jezeli masa wody podlegająca ruchowi falowemu jest ograniczona ścianą, to cząstki wirujące

odbijają się od niej pod kątem padania i powstaje taka sama fala w kierunku odwrotnym. Obie

fale spotykają się, ruchy kołowe, jako przeciwne sobie, znoszą się, w rezultacie występuje oscylacja cząsteczek o podwójnej amplitudzie, bo składowe poziome ruchu fal niweczą się, a pionowe sumują.

Tego rodzaju ruchy ( clapotis) powstają w zbiornikach zamkniętych np. w jeziorach.

### Ruch falowy w przewodach.



Jeżeli sztucznie utrzymywany w położeniu A - B w pewnej chwili straci powód do tego stanu nierównowagi, to nie zajmie odrazu położenia równowagi 0, lecz uczy- ni to dopiero po pewnym czasie

wahań. To zjawisko probowano zastosować do napełniania szluz komorowych i basenów oszczędnościowych. Podobne zjawiska występują przy wszelkich nagłych zmianach ruchu wody np. przy zamknięciu zasuw w przewodach zamkniętych woda w wieży ciśnienia nie u- kłada się w położeniu równowagi, lecz do wyższej wysokości, a zatem i tutaj muszą nastąpić wahania.

Z ruchem falowym najczęściej spotkać się można w wodach stojących, a zatem morzach i jeziorach; wo- dy te jakkolwiek nazywają się stojącymi, zawiera- ją się cząstki poruszające się pod wpływem różno- rodnych sił. Jako przykład ruchów takich przytoczyć należy prądy, czyli jakgdyby rzeki mające płynne koryto; prądy mogą powstawać pod wpływem stale waha- jących się wiatrów i wtedy nie sięgają bardzo głę- boko; istnieją również prądy wyrównywujące gęstość

morza nierównomierną wskutek nierównomierności nagnania i nasycenia solami. Na Bałtyku prąd taki płynie p południowemi ciśnieniami na wschód, północnemi na zachód. Wszystkie powyższe ruchy, jakkolwiek ważne dla żeglugi i nauki, nie mają wielkiego znaczenia dla techniki. Natomiast duże znaczenie ma ruch falowy morza i jezior, powstały pod wpływem wiatru. Wiatr uderzając w powierzchnię wody, powoduje jej poddanie się i uwypuklenie w kierunku wiatru, a zmiana ta poziomą przenosi się od cząstki do cząstki, aż zniknie pod wpływem tarcia wewnętrznego, o ile zniknie uprzednio podnieta ruch. Ponieważ siła wiatru jest wciąż zmienna, zatem i kształt fal, ich wysokość i długość podlega ustawicznym zmianom. Z obserwacji fal i siły wiatru można dojść do wniosku, że wysokość fal rośnie wraz z siłą wiatru, zaś długość i okres fal zależy od siły i czasu trwania wiatru. Jeżeli oznaczmy:

długość fali  $L$

Głębokość  $H$

okres fali  $T$

prędkość fal  $V$

wysokość fal  $h$

prędkość wiatru  $W$

to istnieją następujące dane:  $\frac{h}{L} = 0,03$  do  $0,04$

(max.  $L = 400$  m; max.  $h = 11$  m);  $V = 11$  do  $15$  m/sek.

$V_{\text{max.}} = 24$  m/sek.  $\frac{W}{V} = 0,5$  do  $1,2$ , lub według An-

t n'a V = 6g w .

Najczęściej fale mają L = 100 m. T = 6 - 9 sek.

Na wysokość fal ma również wpływ wielkość przestrzeni na której mogą się one wytwarzać, a zatem odległość między brzegami. Jeżeli wyrazimy ją w milach morskich i oznaczmy przez a, to według Stevensa

$$h = c \cdot \sqrt{a}$$

gdy a < 300 mil. Dla wyższych wartości a, można przyjąć że h od a nie zależy. Dla małych odległości brzegów Stevenson ułożył wzór:

$$h = 0,45\sqrt{a} + (0,75 - 0,3\sqrt{a});$$

Są również wzory uzależniające h od prędkości wiatru a zatem: dla silnych wiatrów  $h = \frac{W}{4}$

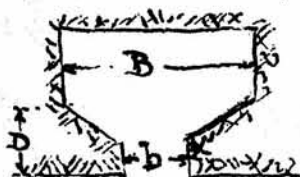
$$\text{" słabych " } h = \frac{W}{3}$$

jest również wzór ogólny:  $h = \frac{3}{4} \sqrt[3]{W^2}$ ;

Gdy zmniejsza się głębokość to wzrasta wysokość fali, ale zmniejsza się jej długość i prędkość przenoszenia się. Zależność tę wyraża wzór:

$$\frac{v}{v_0} = \sqrt{\frac{H_0}{H}}; (H_0 < H)$$

Również wzrasta wysokość fali, a maleje jej prędkość, gdy ona spotyka prąd płynący w kierunku przeciwnym do jej ruchu, to samo zupełnie występuje w zatoce zbieżającej się, natomiast zatoka mająca wąski wpływ, a dalej rozszerzająca się



powoduje zmniejszenie wysokości fali rys. I tutaj Stevenson podaje wzór:

$$\text{wys.fali } x = h \left[ \sqrt{\frac{b}{B}} - 0,027 D \left( 1 + \sqrt{\frac{b}{B}} \right) \right]$$

Specjalnym rodzajem ruchu fłowego, o małej wysokości, a niezmien-

nej długości fal są przyprawy i odpływy morza. Zjawisko to polega na podnoszeniu i opadaniu zwierciadła wody dwa razy w ciągu doby, a związek tego z ruchem planet został już dawno stwierdzony, Teorię podał Newton. Pod wpływem przyciągania księżyca i słońca, płyn okalający ziemię przybiera kształt elipsoidy, która niejako obraca się zgodnie z pozornym ruchem ciała niebieskiego. Osobna elipsoida powstaje wskutek przyciągania księżyca, a osobna wskutek przyciągania słońca. Elipsoidy te jednak wzajemnie się przenikają i raz potęgują, raz znów zmniejszają. W czasie nowiu i pełni fale sumują się i mamy wtedy najwyższy stan (maree haute, Springflut) w czasie 2 i 4 kwadry odejmują się i wytwarza się fala niska. Przy pomocy rozważań teoretycznych wyznaczono wysokość fali powstałej od przyciągania księżyca:

$$h_k = 0,563$$

i od słońca

$$h_s = 0,246$$

A więc w czasie kulminacji  $h = 0,809$  m.

i w czasie 2 i 4 kwadry  $h = 0,317$  m.

Fala przyprawy powstaje na Oceanie spokojnym i stamtąd d. rozchodzi się z prędkością 176 m/sek co dość dobrze zgadza się ze wzorem  $v = \sqrt{gH}$ .

Zauważyć należy, że zarówno czas w którym daje zaobserwować się fala przyprawy, jak i jej wysokość nie zgadza się ściśle z wynikami obliczeń teoretycznych na te odchylenia mają wpływ wszelkie przeszkody, które przeciwdziałają posuwaniu się fal. Wznoszenie się i opadanie wody powoduje prąd przyprawy i odpływu skierowane w przeciwne strony. Maximum prędkości tego prądu występuje podczas kulminacji, minimum = 0 - przy przejściu przyprawy w odpływ. Ciągłe zmiany powierzchni morza spowodowały konieczność ustalenia normalnej powierzchni zwierciadła wody, czyli t.zw. zera, według jakiegoś określonego stanu wody. Stan ten przyjęto różny w różnych państwach. W Niemczech zerem jest poziom leżący o 0,3 m. niżej spodu fali, w czasie wielkiej fali. We Francji zerem jest najniższy stan fali; w meryce średni stan w czasie odpływu.