

przejście jego pod wąskimi mostami.

3. Opór jest tem większy, czem bardziej szorstka jest powierzchnia statku. Statek drewniany powoduje większy opór niż żelazny, a statek starszy większy opór, niż statek nowszy.

4. Opór jest tem większy, czem mniejszy jest stosunek powierzchni zwilżonej przekroju poprzecznego drogi wodnej do powierzchni zanurzonej w wodzie przekroju poprzecznego statku t.j. poniżej górnej wodnicy.

5. Odległość dna statku od dna drogi wodnej poniżej 1 m. wpływa na wielkość oporu statku w odwrotnym stosunku.

6. Przekrój poprzeczny kanału żeglugi nieckowaty, zwarty powoduje najmniejsze opory w porównaniu z innym kształtem przekroju np. trapezowym.

7. Złe sterowanie może zwiększyć opory statku nawet do 60 % wskutek kręcenia się statku.

#### Wzory na opory statku.

1/ Najdawniejszy i najprostszy wzór na opór w wodzie o wielkiej szerokości łóżyska czyli w t. zw. nieograniczonej wodzie opiewa

$$W = k \cdot f (v \pm v_1)^2,$$



gdzie znak + odnosi się do jazdy w górę, a znak — do jazdy w dół,  $U$  chyżość statku względem brzegów,  $U_1$  chyżość wody,  $f$  pow. zwilż. przekroju poprzecznego statku, a  $k$  współczynnik doświadczalny, zależny od kształtu i wielkości statku.

Pierwotna forma tych wzorów brzmi

$$w = \psi \cdot \gamma f \frac{v^2}{2g}$$

gdzie  $\psi$  jest współczynnikiem zależnym od kształtu i wielkości przedmiotu pływającego w wodzie stojącej,  $\gamma$  ciężarem właściwym, a  $g$  przyspieszeniem ziemskim. Wzór ten został wyprowadzony z rozważań Eulera i doświadczeń Dubuat'a.

Należy pamiętać, że w rzece, zwłaszcza nieuregulowanej, spad wody nie jest jednostajny, lecz w łukach mniejszy, a na przejściach nurtu t.zw. przemiałach większy; ten ostatni spad należy uwzględniać przy obliczeniu oporu statków.

Co do chyżości wody-uwaga w ustępie o sprawności statków o własnym popędzie.

## 2/. Formuły Sonne'go:

Opór w wodzie nieograniczonej

$$w_w = k f (v \pm v_1)^{2,25}$$

opór w wodzie ograniczonej



$$w_e = k k_e f v^{2,25}$$

/na kanałach żeglugi/

gdzie dla  $v$  w m/sek.

$k = 8 - 10$  dla parowców rzecznych dobrzezbudowanych

11 - 14 dla łodzi rzecznych — " — " —

18 - 35 dla zwykłych łodzi,

$k_e$  jest współczynnikiem profilu kanału i równa się

$$k_e = \left( \frac{n}{n - (1 + 0,2 \delta^2 v^2)} \right)^{2,25},$$

gdzie  $\delta$  współczynnik wyporu, a  $n = \frac{F}{f}$  t.j. stosunek przekrojów zwilżonych kanału i statku

Wyraz  $k_e$  jest ważny dla  $\delta < 0,95$ , a dla  $n > 10$  należy przyjąć  $k_e = 1$ .

Wpływ małej odległości dna statku od dna drogi uwzględnia Sonne przez założenie

$$k_e = \frac{0,9 k_m Z_m}{Z},$$

gdzie  $k_m$  oznacza współczynnik wyrachowany z poprzedniej formuły na  $k_e$  dla średniej odległości  $Z_m$  dna statku od dna kanału, a  $Z$  odległość dla której szukamy  $k_e$ .

Sonne próbował wprowadzić do formuły powierzchnię zwilż. statku  $O$  i podał wzór

$$w = k_o \cdot O \cdot v^{2,25}$$



3/ Formuła de Mas'a:

$$w = (a + bt)(v \pm v_r)^{2,25}$$

gdzie  $t$  oznacza głębokość zanurzenia, a  $a$  i  $b$  są współczynnikami. Dla łodzi Péniche wypada

$$a = 21,3, \quad b = 123,6$$

Dla wody ograniczonej /kanał żeglugi/ radzi de Mas pomnożyć  $w$  przez współczynnik  $C$ , który rośnie ze wzrostem chyżości, a maleje ze wzrostem stosunku  $n = \frac{F}{f}$

4/ Wzory Gebersa:

a/ W kanale żeglugi:

$\alpha$ ) gdy odstęp dna statku od dna kanału jest większy, niż 1 m.:

$$w = (kf + \xi O)(v + v_r)^{2,25},$$

$\beta$ ) gdy ten odstęp jest mniejszy, niż 1 m.:

$$w = (kf + \xi O_b + \xi_d O_d)(v + v_r)^{2,25},$$

w których to wzorach oznaczają:

$v$  - chyżość statku względem brzegów w m/sek

$v_r$  - chyżość prądu wstecznego, w m/sek.

$f$  - przekrój poprzeczny statku poniżej górnej wodnicy w  $m^2$ ,

$O$  - powierzchnia statku zanurzona w wodzie w  $m^2$

$O_b$  - " boków statku " " "

$O_d$  - " dna " " "



$k$  - współczynnik oporu zależny od kształtu statku,

$\xi$  - " " " " od szerokości powierzchni statku zanurzonej w wodzie,

$\xi_d$  - współczynnik oporu zależny od szerokości dna statku i od odległości dna statku od dna drogi.

We wzorach tych można przyjąć:

$$f = \beta b t, \quad C_d = \alpha l b,$$

$$C = 0,85 l (b + 2t), \quad C_d = C - C_d$$

gdzie  $l$  oznacza długość między pionami,  $b$  szerokość statku,  $t$  zanurzenie, a  $\alpha$  i  $\beta$  współczynniki pełności poziomej i poprzecznej i w przybliżeniu  $\alpha \approx 0,7$  /dla ostrych, a 0,8 dla tępych kształtów statku/  $\beta = 0,98$ .

$k = 1,7$  dla statków o ostrym kształcie i często dla próżnych łodzi,

$k = 3,5$  dla statków o tępych kształcie /załadowanych łodzi kanałowych/,

$\xi = 0,14$  dla statków żelaznych dobrze pomalowanych; dla statków drewnianych o szorstkim dnie do 0,28 a nawet więcej.

$\xi_d$  dla statków żelaznych dobrze pomalowanych;



$\xi_d = 0.140$  dla odległości dna statku od dna drogi  
równej 1 m.

= 0.185      "      "      "      "      "      "

równej 0,75 m.

= 0.258 dla      "      "      "      "      "

równej 0,50 m.

= 0.350 dla      "      "      "      "      "

równej 0.25 m.

i rośnie ze wzrastającą szorstkością dna. Dla bardzo szorstkiego dna drewnianego należy dla podwójnej odległości od dna drogi przyjąć podwójną wartość na  $\xi_d$ .

Wielkość  $V_r$  oznacza się z równania

$$(f + f_s) v = (F - f - f_s) V_r$$

która oznacza, że ilość przepływu wody w sek. wypchniętej z chyżością statku  $V$  równa się ilości wody płynącej wstecz resztą przekroju w kanale z chyżością  $V_r$  /rys.34/.

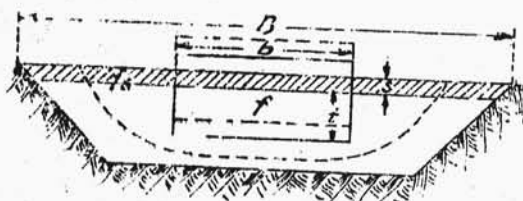
Stąd

$$V_r = V \frac{(f + f_s)}{(F - f - f_s)}$$

Kładąc w przybliżeniu  $f_s = 0$ , otrzymujemy:



$$v_r = v \frac{f}{F-f} \quad \text{a dla} \quad \frac{F}{f} = n \quad v_r = \frac{v}{n-1}$$



Rys. 34.

Licząc dokładniej należy wyznaczyć obniżenie zwierciadła wody  $S$  ze wzoru :

$$S = \frac{(v + v_r)^2 - v^2}{2g}$$

gdzie  $g$  oznacza przyspieszenie ziemskie, a za  $v_r$  należy wstawić wartość przybliżoną  $\frac{v}{n-1}$

Mając wartość na  $S$  wyznacza się  $f_s = B \cdot S$  a następnie dokładną wartość na  $v_r$  ze wzoru:

$$v_r = v \frac{f + f_s}{F - f - f_s}$$

b/ W rzece:

$$W = (k \cdot f + \xi Q_b + \xi_d Q_d) (v + v_r + v_i)^{2,25}$$



w którym to wzorze oznaczenia zostają te same, co we wzorze dla kanału żeglugi, na  $v_r$  można przyjąć wartość przybliżoną  $\frac{v}{n-1}$ , a bardzo często opuścić jako zbyt małą.

Do wartości oporu w rzece, obliczonej powyższym wzorem /jak również innemi wzorami/, należy jeszcze doliczyć wartość oporu, spowodowanego ślizganiem się statku, która równa się składowej wyporu statku równoległej do zwierciadła wody t.j.  $v \sin \varphi = v \operatorname{tg} \varphi = v J$ , czyli wyporowi statku pomnożonemu przez spad wody w rzece  $J$ . Na rzekach o małym spadzie wartość  $v J$  jest tak mała, że praktycznie można ją opuścić.

5. Metoda Froude'a i Thiele'go polega na zużytkowaniu wyników badań laboratoryjnych. Można ją zastosować oczywiście tam, gdzie ma się do dyspozycji wyniki badań, przeprowadzonych na odnośnych modelach.

a/ Na wodzie nieograniczonej.

Rozdzielamy opór statku  $W$  i modelu  $w$  na opór wywołany tarciem wody o pow. statku  $W_1$  i modelu  $w_1$ , tudzież na resztę oporów  $W_2$ , względnie  $w_2$ , wywołanych kształtem statku i jego modelu przez fale i wiry.



$W_1$  i  $w_1$  wyznaczamy ze wzoru.

$$W_1 = \xi \gamma^0 v^{\chi} \quad \text{ i } \quad w_1 = \xi_1 \gamma^0 v_1^{\chi_1}$$

gdzie współczynniki  $\xi$  i  $\xi_1$  oraz  $\chi$  i  $\chi_1$  są doświadczalnie wyznaczone i wynoszą  $\xi$  i  $\xi_1$ , od 0,193 do 0,160, a  $\chi$  i  $\chi_1$ , od 1,8 do 1,9, zaś  $\gamma^0$  i  $\gamma^0$  oznaczają powierzchnie zwilżone statku i modelu, a  $v$  i  $v_1$  chyżość statku i modelu.

Jeśli przez  $m$  nazwiemy stosunek podobieństwa długości statku  $L$  do długości modelu  $\ell$ , czyli

$$\frac{L}{\ell} = m, \quad \text{ to } v_1 = \frac{v}{\sqrt{m}}, \quad \text{ gdyż } \frac{g}{2} = \frac{L}{T^2} = \frac{\ell}{t^2}$$

gdzie oznaczają  $T$  i  $t$  - czasy trwania zjawisk podobnych, a  $g$  przyspieszenie ziemskie, zatem

$$\frac{v^2}{L} = \frac{v_1^2}{\ell} \quad \text{ a } \quad v_1 = \frac{v}{\sqrt{\frac{L}{\ell}}}$$

Dalej  $\sigma = \frac{\gamma^0}{m^2}$

Zatem

$$w_1 = \xi_1 \frac{\gamma^0}{m^2} \left( \frac{v}{\sqrt{\frac{L}{\ell}}} \right)^{\chi_1}$$

a  $w_2 = w - w_1$

zaś

$$W_2 = m^3 w_2 = m^3 w - m^3 w_1$$

zatem

$$W = W_1 + W_2 = W_1 + m^3 w - m^3 w_1 = m^3 w - (m^3 w_1 - W_1)$$



Widzimy zatem, że opór całkowity statku równa się oporowi całkowitemu modelu, pomnożonemu przez 3-ą potęgę stosunku podobieństwa mniej różnica między oporem tarcia modelu, pomnożonemu przez 3-ą potęgę stosunku podobieństwa, a oporem tarcia statku.

b/ W wodzie ograniczonej /na kanale żeglugi/.

Całkowity opór statku i modelu  $W$  i  $w$  dzielimy na 3 części, a mianowicie na  $W_1$  i  $w_1$  t.j. opór wody o dno statku i modelu, tarcia,  $W_2$  i  $w_2$  t.j. opór tarcia wody płynącej wstecz o ściany i dno drogi i  $W_3$  wzgl.  $w_3$  t.j. reszta oporów wywołanych kształtem statku i modelu przez fale i wiry.

$W_1$  i  $w_1$  wyznaczamy ze wzoru :

$$W_1 = \xi \cdot \rho (v + v_r)^2 \quad \text{ i } \quad w_1 = \xi_1 \cdot \rho (v_1 + v_{1r})^2$$

$W_2$  i  $w_2$  : Praca tarcia, jaką woda płynąca wstecz powoduje, wynosi na długość statku  $L$   
/rys. 34/:



$$\gamma \cdot L (F - f - f_s) J_r v_r,$$

gdzie  $J$  oznacza ciężar właściwy wody, a siła, jaką należy przyłożyć do liny holowniczej dla pokonania tegoż oporu  $w_2$ , aby statek poruszał się z chyżością  $v$

$$w_2 = \gamma L (F - f - f_s) J_r \cdot \frac{v_r}{v}$$

wstawiając  $v_r = \frac{v(f + f_s)}{(F - f - f_s)}$

przeto  $w_2 = \gamma \cdot L \cdot (f + f_s) J_r$

ponieważ  $\gamma L f = V$  /wypór statku/ i  $\gamma L f_s = V_s$  /wypór obniżenia zwierc. wody w kanale/, przeto

$$w_2 = (V + V_s) J_r$$

t.j. równa się sumie wyporów statku i obniżenia, pomnożonej przez spadek średni zwierciadła wody, który należy wyznaczyć z formuły  $v_r = k \sqrt{R \cdot J_r}$ , gdzie

$$R = \frac{F - f - f_s}{\text{obwód zwilż. kanału} + \text{obwód zwilż. statku}}$$

Podobnie da się wyznaczyć  $w_2$ .

$$w_3 = w - w_1 - w_2,$$

a

$$W_3 = m^3 w_3 = m^3 w - m^3 (w_1 + w_2)$$



Wobec czego

$$W = W_1 + W_2 + W_3 = W_1 + W_2 + m^3 w - m^3 (w_1 + w_2)$$

$$W = m^3 w - [m^3 (w_1 + w_2) - (W_1 + W_2)]$$

zatem opór całkowity statku równa się oporowi całkowitemu modelu, pomnożonemu przez 3-ą potęgę stosunku podobieństwa, mniej różnica między oporami tarcia modelu o wodę i tarcia wody wypchniętej przez niego o ściany i dno kanału laboratoryjnego, tudzież o powierzchnię modelu, pomnożonemi przez 3-ą potęgę stosunku podobieństwa a oporami tarcia statku o wodę i wody wypchniętej przez niego o ściany i dno kanału, tudzież o powierzchnię statku.

Thiele obliczając w sposób powyższy opory łodzi Emden /najw. dł. 67 i szer. 8,1 m./, z którą robiono doświadczenia na kanale Dortmund-Ems badał opory modelu o stosunku podobieństwa = 9, a do wyznaczenia spadku prądu wstecznego  $J_r$  użył wzoru Hesslego

$$v = C (1,0 + 0,5 \sqrt{R}) \sqrt{R J_r},$$

w którym przyjął dla statku  $C = 36$ , a dla modelu  $C = 61,1$ .

Dla zanurzenia 1,75 m. ( $V = 8/5 t$ ) i chyżości statku  $v = 1 m$  wypadło np.:  $R = 1,05 m$ ,  $J_r = 0,038 mm$  na 1 m.,  $V_s = 70 t$ ,  $W_1 = 181 kg$ ,  $W_2 = 34 kg$ ,  $W_3 = 165 kg$ , razem  $W = 380 kg$  /próbné jazdy dały  $W = 365 kg$



Z powyższego przedstawienia wynika, że wyznaczenie oporów statków, zwłaszcza na rzekach niosących rumowisko, jest niedosć dokładne. Z tego powodu na wielu rzekach stosuje się przy odbiorze statku próbną jazdę na odcinkach stale do tego celu używanych.

Przykład: Jakie wymiary i jak silną maszynę powinien mieć parowiec kołowy, przeznaczony do holowania pociągów, złożonych z 2 łodzi żelaznych o poj. 400 t każda z chyżością 4 km/godz. na rzece o głębokości najmniejszej 1.65 m. i spadzie 0,2‰ ?

Chyżość średnią wody otrzymamy z wzoru Matakiewicza  $V_s = 0,78$  m/sek. Największa chyżość wody

$$V_w = 0,78 \frac{3}{2} = 1,17 \text{ m/sek.}$$

Opory obliczamy wzorem Gebersa.

Wymiary łodzi:  $L = 55$  m.,  $B = 8$  m.,  $t = 1,40$  m.

$$f = \beta \cdot B \cdot t = 0,95 \times 8 \times 1,4 = 10,64 \text{ m}^2$$

$$O = 0,85L(B + 2t) = 504,9 \text{ m}^2$$

$$O_d = 0,85L \cdot B = 352 \text{ m}^2$$

$$O_a = O - O_d = 152,9 \text{ m}^2$$

$$k = 3,5; \quad \xi = 0,2, \quad \xi_d = 0,35$$

$$\text{Opór łodzi } W_T = (3,5 \times 10,64 + 0,2 \times 152,9 + 0,35 \times 352) / (1,11 + 1,17)^{2,25} = 1332 \text{ kg}$$

$$\text{Opór 2 łodzi } = 2664 \text{ kg}$$



Opór holownika przyjmujemy na razie 400 kg  
 $N = 3064 \text{ kg}$

$$N_i = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{N \cdot (v + v_w)}{75} = \frac{3064 \cdot 2,28}{0,4 \cdot 75} = 235 \text{ HP}_i$$

Przyjmując wymiary holownika: najw. długość 42,0 m., szerokość /bez obudowy kół/ 6,00 m., zanurzenie robocze 0,90 m.  $\delta = 0,8$ , otrzymamy wypór

$$V = 0,8 \times 42 \times 6 \times 0,9 = 181,4 \text{ t}$$

ciężar własny w przybl.  $181 \times 4 \times 0,5 = 90,7 \text{ t}$

ciężar maszyny około  $0,2 \times 235 = 47,0 \text{ t}$

zapas węgla ..... = 10,0 t

narzędzia i obsługa  $0,1 \times 181,4 = 18,1 \text{ t}$

---

165,8 t

Następnie na podstawie danych dokładnych co do holownika należy obliczyć jego opór, sprawdzić potrzebną siłę maszyny, obliczyć dokładnie wypór jego przy zanurzeniu roboczym i sprawdzić, czy ciężar własny statku wraz z ciężarem maszyny, urządzenia, obsługi i zapasu węgla nie przekracza wyporu.



Porównanie oporów na wodzie i na kolei żelaznej.

Opór pociągu kolejowego towarowego w linii prostej i w poziomie wynosi:

$$W_k = 1,8 + 0,0011 v^2 \quad \text{w kg. na 1 tonę pociągu.}$$

Jeżeli stosunek ciężaru ładunku do ciężaru pociągu kolejowego wynosi około 0,6, to opór na 1 t. ładunku na kolei żelaznej w linii prostej i w poziomie wynosi:

$$W_k = 3,0 + 0,002 v^2 \quad \text{w kg.}$$

Opór łodzi tow. holowanej na rzece wolnej da się wyrazić w przybliżeniu wzorem:

$$W_T = \frac{k \cdot f (v + v_w)^{2,25}}{V} = \frac{k (v + v_w)^{2,25}}{\frac{\delta}{\beta} \cdot L} \quad \begin{array}{l} \text{w kg. na} \\ \text{1 t. wyporu.} \end{array}$$

do czego należy doliczyć około 0,1 kg. jako opór holownika.

Dla  $k = 14$ ,  $L = 65$  m. /łódź 600 t/,  $\delta = 0,9$ ,  $\beta = 1$  m.,  $v_w = 1$  m. i dla stosunku ciężaru ładunku do wyporu łodzi i holownika równego 0,8, wypada:

$$W_T' = 0,12 + 0,3 (v + 1)^{2,25} \quad \text{w kg. na 1 t. ładunku.}$$

Opór łodzi tow. holowanej na rzece skanalizowanej da się wyrazić podobnie:



$$W_T'' = 0,12 + 0,3 v^{2,25} \quad \text{w kg. na 1 t. ładunku.}$$

Opór łodzi holowanej na kanale żeglugi wynosi:

$$W_T''' = 0,12 + 0,3 v^{2,25} \left( \frac{n}{n - (1 + 0,2 \delta^2 v^2)} \right)^{2,25}$$

dla  $n = 4,5$  i  $\delta = 0,9$

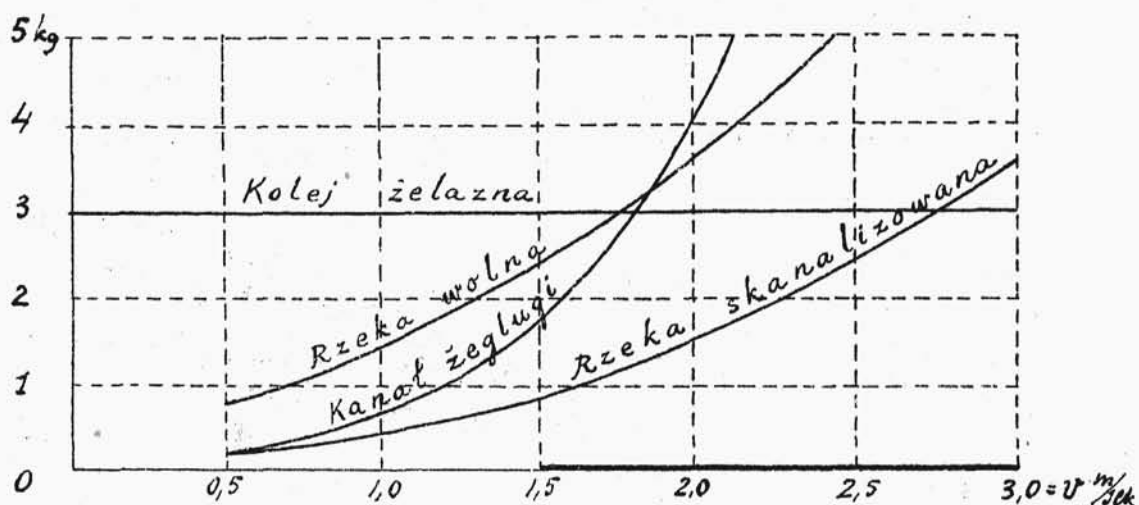
$$W_T''' = 0,12 + 0,3 v^{2,25} \left( \frac{4,5}{4,5 - (1 + 0,162 v^2)} \right)^{2,25} \quad \text{w kg. na 1 t. ładunku.}$$

Z tych wzorów wypadają opory w kg. na 1 t. ładunku dla różnych chyżości według poniższej tabelki:

Chyżość w m/sek.	Kolej	Łódź na		
		rzęce wolnej	rzęce skanalizo- wanej.	kanale
0,5	3,00	0,88	0,18	0,23
1,0	3,00	1,55	0,42	0,71
1,5	3,00	2,48	0,88	1,93
2,0	3,01	3,67	1,55	4,11
2,5	3,01	5,15	2,48	9,09
3,0	3,02		3,67	

Wykres tych oporów przedstawia się następująco:





Z powyższego zestawienia jest widocznem:

1/ Praktyczna granica chyżości ekonomicznej dla ruchu towarowego wynosi na rzekach wolnych i kanałach żeglugi 1,5 - 2,0 m/sec. t.j. 5 - 7 km/godz., a rzekach skanalizowanych 2,5 - 3 m/sec. t.j. 9 - 11 km/godz. Statki osobowe kursują wprawdzie na rzekach i jeziorach z chyżościami dochodzącymi do 30 km/godz. służą jednak w krajach o należycie rozbudowanej sieci kolejowej tylko dla ruchu podmiejskiego i wycieczkowego. Drugą granicą co do chyżości statków na kanałach żeglugi jest ochrona skarp i dna kanału przed zniszczeniem wskutek fal i wirów; z tego powodu ogranicza się chyżość statków na kanałach do 5 km/godz.

2/ Opory na wodzie są znacznie mniejsze od oporów na kolei żelaznej - przy małych jednak chyżościach statków.