

Za najlepszy dla ściągn należy uważać przekrój rurowy. Jeżeli chodzi o wzmocnienie tego przekroju, to może ono być wykonane w postaci dodatkowych kątowników pośrodku wysokości przekroju na wewnątrz, gdyż zewnętrzne kątowniki komplikowałyby przytwierdzenie belek poprzecznych do ściągnów, które odgrywają rolę pasów dolnych dźwigarów belkowych.

Rozdział II

MOSTY WISZĄCE

1. Charakterystyka mostów wiszących

Mosty wiszące należą do układów rozporowych i tym się różnią od mostów łukowych, że rozpór ich skierowany jest w stronę odwrotną, tj. na zewnątrz dźwigarów.

O ile dźwigary łukowe starają się rozsunąć podpory, o tyle układy mostów wiszących dążą do zbliżenia podpór.

Mosty wiszące są mostami wyłącznie z jazdą dołem (rys. 613).



Rys. 613

Ponieważ łańcuchy oraz wieszaki mają na zewnątrz mostu niewielkie wymiary, a wieszaki zwykle dość rzadko rozstawione, przeto konstrukcja mostów wiszących, wznosząca się ponad jezdnią, nie zasłania widoku otoczenia i przy zwieszających się łańcuchach oraz przy dużej rozpiętości sprawia wrażenie budowli majestatycznych.



Rys. 614

Do zalet mostów wiszących należą:

- 1) możliwość montowania mostu na miejscu budowy bez rusztowań;
- 2) stateczność, gdyż środek ciężkości całego przęsła leży znacznie niżej niż punkty podparcia łańcuchów;
- 3) materiał użyty do najważniejszej części składowej tych mostów, mianowicie stal w łańcuchach, pracuje odpowiednio do swych właściwości, tj. na rozciąganie;
- 4) możliwość budowania przęsła o dużej rozpiętości. Mimo tych zalet mosty wiszące mają jednak i wady.

Najważniejszą ich wadą jest mała sztywność oraz znaczne przesunięcia pionowe i przesunięcia poziome. Dlatego też konstrukcje wiszące nie nadają

się do mostów kolejowych. Jako mosty drogowe są często stosowane, gdy ciężar własny mostu jest od trzech do pięciu razy większy niż obciążenie ruchome. Przy takim stosunku obciążenia stałego do obciążenia ruchomego nie odczuwa się drgań mostu.

Na rysunku 419 podany jest przekrój poprzeczny mostu wiszącego. Kratowe belki poprzeczne nadają konstrukcji sztywność w poprzecznym kierunku mostu.

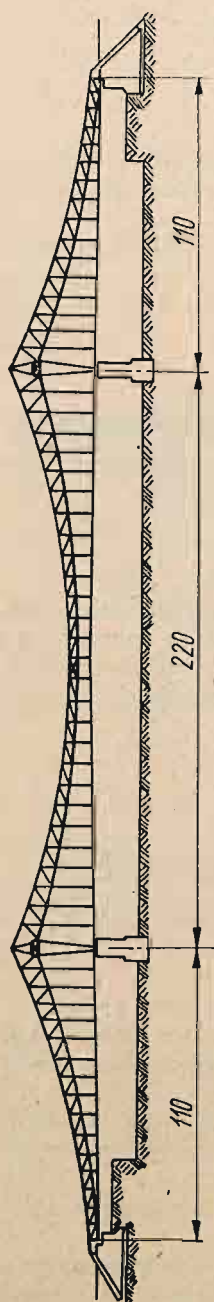
Drugą wadą mostów wiszących jest rozpór, który wymaga użycia dużych brył kamiennych do zakotwienia łańcuchów, co znacznie podraża całość budowli. Łańcuchy kotwiczne należy umieszczać znacznie niżej terenu w specjalnych korytarzach tunelowych w miejscach w zasadzie wilgotnych, co również należy zaliczyć do wad mostów wiszących.

Mostów wiszących, jako łańcuchów gibkich, na których podwiesza się część przejazdową, nie stosuje się obecnie, chyba w postaci niewielkich mostów dla pieszych.

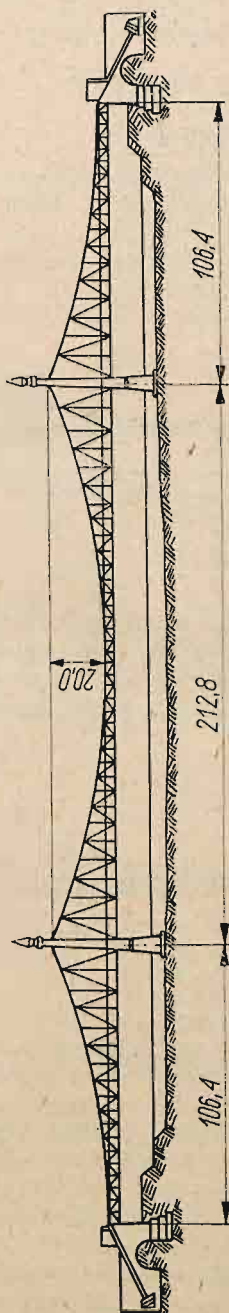
Obecnie buduje się mosty wiszące z tak zwaną belką usztywniającą (rys. 614).

Do usztywniania mostów wiszących można stosować i inne środki, np. sztywne łańcuchy (rys. 615). Można łączyć kratą łańcuch z belką podłużną jezdni i otrzymać most wiszący kratowy (rys. 616). Wreszcie można stosować łańcuch z belką usztywniającą (rys. 617).

Łańcuchy sztywne, na których jest podwieszona jezdnia mostu, przedstawiają pod względem statycznym odwrócone dźwigary łukowo-kratowe, trójpřegubowe lub dwupřegubowe, które pod względem statycznym nie różnią się od takich układów łukowych i dlatego oblicza się je jak układy łukowe.

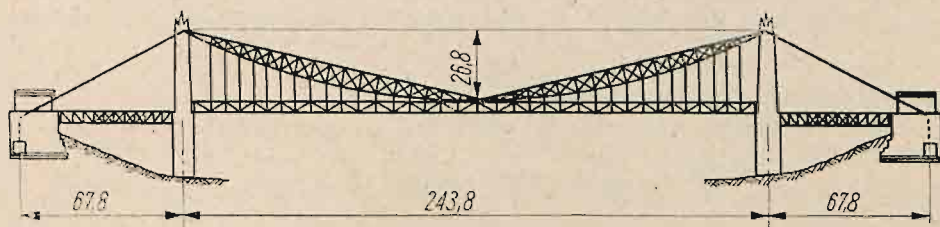


Rys. 615



Rys. 616

Ze wszystkich tych układów z uwagi na obliczenia statyczne rozpatrzmy tylko dwa: mosty wiszące gibkie i mosty wiszące z belką usztywniającą.



Rys. 617

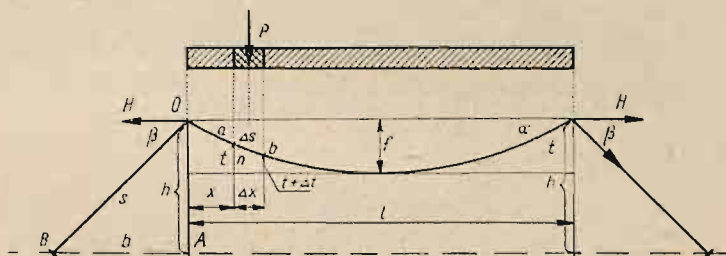
2. Obliczanie mostów wiszących gibkich

Rozpatrzmy łańcuch, zawieszony w dwóch punktach rozstawionych w odległości l (rozpiętość mostu) i ze strzałką f (rys. 618).

Na łańcuchu tym podwieszono jest w sposób ciągły obciążenie równomierne p T/mb.

Jeżeli łańcuch znajduje się tylko pod ciężarem własnym, to jak wiadomo, przyjmie on kształt krzywej łańcuchowej.

Na odcinek ab łańcucha działają siły pionowe t , $(t + \Delta t)$ i P .



Rys. 618

Dla utrzymania tego odcinka w równowadze niezbędne jest, aby rzut działających nań sił na dowolną prostą był w równowadze.

Sam łańcuch przyjmujemy za nieważki, a więc możemy napisać:

$-t \cos(t, n) + (t + \Delta t) \cos(t + \Delta t, n) - P \cos(P, n) = 0$. Dzielimy to równanie przez Δx i mając na względzie, że

$$\frac{P}{x} = p.$$

otrzymamy:

$$\frac{1}{\Delta x} [(t + \Delta t) \cos(t + \Delta t, n) - t \cos(t, n)] = p \cos(p, n). \quad [7]$$

Jeżeli odcinek $ab = \Delta s$ będziemy tak zmniejszać, że $\Delta s \rightarrow ds$, a $\Delta x \rightarrow dx$, to równanie (7) ulegnie przekształceniu:

$$\frac{dt \cos(t, n)}{dx} = p \cos(p, n).$$

Rzutuując siły na oś odciętych i na oś rzędnych możemy napisać:

$$\frac{dt}{dx} \cdot \frac{dx}{ds} = 0; \quad t \frac{dx}{ds} = H \quad [8]$$

$$\frac{dt}{dx} \cdot \frac{dy}{ds} = p; \quad t \frac{dy}{ds} = px + C \quad [9]$$

przy wybranych współczynnikach $C = 0$.

Jeżeli podzielimy równanie (9) przez (8), to otrzymamy:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{p}{H} x, \quad \text{czyli} \quad \frac{p x^2}{H} + C_1 = \frac{p x^2}{H},$$

gdyż $C_1 = 0$.

Otrzymaliśmy równanie paraboli drugiego stopnia.

Równania (8) i (9) wskazują, że rzut siły w łańcuchu na oś X -ów w dowolnym punkcie jest wielkością stałą, rzut zaś tej siły na oś Y -ów jest proporcjonalny do odciętej.

W punkcie o mamy

$$\frac{dx}{ds} = 1 \quad \text{i} \quad \frac{dy}{ds} = 0,$$

a więc $t = H$, tj. naciągowi w najniższym punkcie łańcucha, czyli rozporowi w łańcuchu.

Przy $x = \frac{l}{2}$ i $y = f$ otrzymamy równanie $y = \frac{p}{H} x^2$ i rozpór $H = \frac{pl^2}{8f}$, tj. rozpór, który co do swej wielkości jest taki sam jak w łuku trójp przegubowym tej samej rozpiętości i strzałki.

Naciąg łańcucha w dowolnym punkcie otrzymamy z równania:

$$t = H \frac{ds}{dx} = H \sqrt{\frac{dx^2 + dy^2}{dx^2}} = H \sqrt{1 + y'^2},$$

lecz

$$\frac{dy}{dx} = y' = \frac{p}{H} x,$$

przeto

$$t = H \sqrt{1 + \frac{p^2 x^2}{H^2}} = \sqrt{\frac{p^2 l^4}{8^2 f^2} + p^2 x^2} = \frac{1}{2} pl \sqrt{\left(\frac{l}{4f}\right)^2 + \left(\frac{2x}{l}\right)^2};$$

przy $x = \frac{l}{2}, \quad t = \frac{1}{2} pl \sqrt{1 + \left(\frac{l}{4f}\right)^2}.$

Długość łańcucha otrzymamy z równania:

$$ds = dx \sqrt{1 + y'^2} = dx (1 + y'^2)^{\frac{1}{2}} = dx \left(1 + \frac{1}{2} y'^2 + \frac{1}{8} y'^4 + \dots\right).$$

Zadawalając się trzema wyrazami rozwinięcia dwumianu Newtona i wstawiając $y' = \frac{8fx}{l^2}$, otrzymamy po całkowaniu w granicach od 0 do $1/2$ długość połowy łańcucha:

$$s = \frac{l}{2} \left(1 + \frac{8}{3} \frac{f^2}{l^2} - \frac{32}{5} \frac{f^4}{l^4}\right). \quad [10]$$

Za pomocą wyprowadzonych wzorów możemy obliczyć łańcuch podwieszony.

Pozostaje jeszcze obliczyć łańcuch utrzymujący, czyli kotwiczny. Oznaczwszy przez α i β kąty, jakie tworzy z poziomem łańcuch podwieszony i łańcuch kotwiczny w punkcie zawieszenia, i odrzuciwszy tarcie na pilonie, które zależne jest od sposobu podparcia łańcuchów na pilonach, możemy napisać następujące równanie, rzutując siły na oś poziomą (rys. 618):

$$t \cos \alpha = T' \cos \alpha, \quad \text{czyli} \quad T' = t \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}.$$

Długość łańcucha kotwicznego oo' wyniesie $s_1 = \frac{h}{\sin \beta}$.

Jeżeli naprężenie dopuszczalne w łańcuchu jest k , to przekrój łańcucha będzie $F = \frac{t \cos \alpha}{k \cos \beta}$, a objętość jego

$$V = \frac{t \cos \alpha h}{k \cos \beta \sin \beta} = \frac{2th \cos \alpha}{k \sin 2\beta}.$$

Ponieważ sinus zmiennego kąta 2β ma największą wartość przy $2\beta = 90^\circ$, przeto największą objętość łańcucha utrzymującego otrzymamy przy pochyleniu jego do poziomu pod kątem 45° .

Rozpatrzmy wpływ naciągu łańcuchów i zmiany temperatury na zmianę strzałki f . Wzór (10) możemy napisać:

$$2s = l \left(1 + \frac{8}{3} \frac{f^2}{l^2} - \frac{32}{5} \frac{f^4}{l^4} \right); \quad [11]$$

we wzorze tym są trzy wielkości, z których jedną można przyjąć za stałą, drugą za zmienną niezależną, a wtedy trzecia będzie funkcją tej zmiennej niezależnej.

Znajdziemy najpierw zależność zmiany strzałki od zmiany rozpiętości. Wariacja wzoru (11) daje:

$$\delta f = - \frac{1 - \frac{8}{3} \frac{f^2}{l^2} + \frac{96}{5} \frac{f^4}{l^4}}{\frac{16}{3} \frac{f}{l} - \frac{128}{5} \frac{f^3}{l^3}} \delta l.$$

Zależność zmiany strzałki od zmiany długości łańcucha otrzymamy z wariacji względem s , przyjmując, l za stałą:

$$\delta f = \frac{2 \delta s}{\frac{16}{3} \frac{f}{l} + \frac{128}{5} \frac{f^3}{l^3}}$$

Zmiana rozpiętości powstaje przy zmianie długości łańcuchów utrzymujących. Zmiana ta zaś może nastąpić z powodu wydłużenia wskutek naciągu i wskutek zmiany temperatury.

W zależności od naciągu wydłużenie to będzie:

$$\Delta_1 s = \frac{Th}{EF \sin \beta},$$

a w zależności od temperatury $\Delta_2 s = \alpha t s$; stąd całkowite wydłużenie wyniesie: $\Delta s = \Delta_1 s + \Delta_2 s$. Z trójkąta AOB (rys. 618) mamy $s_1^2 = h^2 + b^2$, zatem $s_1 \Delta s_1 = h \Delta h + b \Delta b$. Jeżeli wysokość pilonów się nie zmienia, to $\Delta b = \frac{s_1}{b} \Delta s_1$.

Z ostatniego wzoru otrzymujemy zależność zmiany rozpiętości od zmiany długości łańcucha kotwicznego

$$2\Delta b = \pm \frac{2s_1}{b} (\Delta_1 s_1 + \Delta_2 s_1) = \pm \frac{2s_1 \Delta s_1}{b} = \pm \delta l.$$

Wydlużenie łańcucha podwieszonoego z powodu jego naciagu otrzymamy ze wzoru:

$$\begin{aligned} \delta s &= 2 \int_0^{\frac{l}{2}} \frac{tds}{EF} = \frac{2H}{EF} \int_0^{\frac{l}{2}} \frac{ds}{dx} ds = \frac{2H}{EF} \int_0^{\frac{l}{2}} (1 + y'^2) dx = \\ &= \frac{\rho l^2}{4EF} \int_0^{\frac{l}{2}} \left[1 + \left(\frac{8f^2}{l^2} \right) x^2 \right] dx = \frac{\rho l^3}{8EF} \left(1 + \frac{8}{3} \frac{f^3}{l^3} \right), \end{aligned}$$

przy warunku, że przekrój łańcucha F jest stały.

Gdyby przekrój łańcucha był zmienny, to byłoby konieczne podzielenie jego długości na oddzielne ogniwa, obliczenie wydłużenia każdego ogniwa i znalezienie sumy wydłużeń.

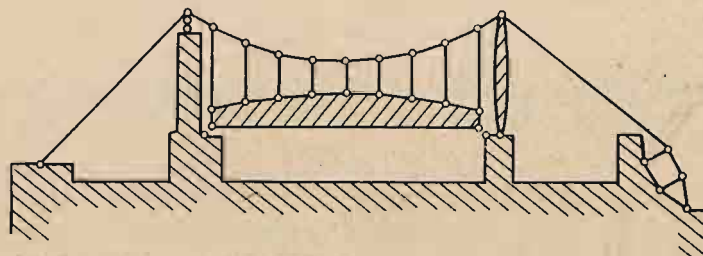
Powyższe wzory umożliwiają obliczenie zwiększenia lub zmniejszenia strzałki f w zależności od różnych czynników.

Zmiana strzałki $\pm \Delta f$ potrzebna jest przy montowaniu mostu na podporach.

Należy dążyć do tego, aby przy największym zwiększeniu strzałki f nie otrzymać pomostu wklęsłego. Wielkość strzałki łańcucha przyjmuje się zwykle w granicach od $\frac{1}{8}$ do $\frac{1}{13} l$.

3. Obliczenie mostów wiszących, usztywnionych belką

Układ ten należy do układu jednokrotnie statycznie niewyznaczalnego (rys. 619).



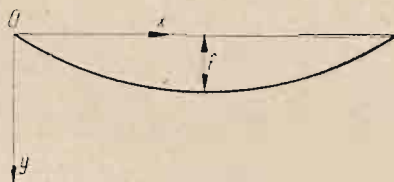
Rys. 619

Wysokość belki usztywniającej wynosi od $\frac{1}{30}$ do $\frac{1}{60} l$, najczęściej około $\frac{1}{40} l$.

Wprowadzimy do obliczenia następujące założenia:

- 1) przekrój łańcucha F_x jest zmienny, przy czym naprężenie w każdym przekroju jest jednakowe, a więc $F_x \frac{dx}{ds} = F_0$, gdzie F_0 oznacza przekrój w najniższym punkcie łańcucha

- 2) wieszaki są podwieszone w sposób ciągły, wskutek czego łańcuch ma kształt paraboli o równaniu $y = \frac{4f}{l^2} x (l - x)$ przy współrzędnych jak na rysunku 620;
- 3) wydłużenia wieszaków nie uwzględniamy, gdyż jest bardzo małe i prawie nie wpływa na różnicę odkształceń belki i łańcucha.



Rys. 620

Dalej zakładamy, że w danym punkcie łańcuch obniży się w tym samym stopniu jak i belka usztywniająca, której moment bezwładności jest $I = \text{const}$.

Belka A_1B_1 jest podwieszona na łańcuchu A_2B_2 za pomocą wieszaków $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ (rys. 621).

Na belkę A_1B_1 działają siły skupione P_1, P_2, \dots, P_n . Jeżeli siły w wieszakach oznaczamy przez N_1, N_2, \dots, N_n a reakcje przez A_2, B_2 i A_1B_1 , to możemy napisać $A_2 + B_2 = \Sigma N_i$ zaś $A_1 + B_1 = \Sigma P_i - \Sigma N_i$.

Moment zginający w przekroju w odległości x od podpory A_1 wyrazi się wzorem:

$$M_x = A_1x - \Sigma P(x-a) + A_2x - H(y - y_1) + t_x y_1 \cos \alpha;$$

ponieważ $t_x = \frac{H}{\cos \alpha}$, to $M_x = (A_1 + A_2)x - \Sigma P(x-a) - Hy$.

Gdybyśmy mieli do czynienia tylko z belką bez łańcucha i obciążoną tymi samymi siłami, wówczas moment zginający byłby: $M'_x = Ax - \Sigma P(x-a)$; ponieważ $A = A_1 + A_2$, to możemy napisać: $M_x = M'_x - Hy$, czyli otrzymalibyśmy taki sam wzór jak w układzie łukowym dwuprzegubowym.

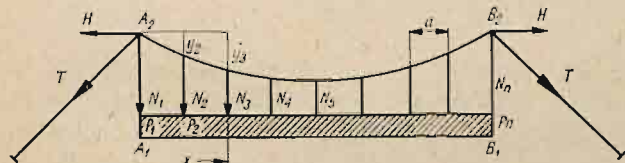
Sztywność belki oznaczamy przez EI .

Pod działaniem siły P belka się odkształca i w przekroju w odległości x od podpory A ugnie się na Δy .

Równanie odkształconej belki będzie:

$$EI \frac{d^2 \Delta y}{dx^2} = -M_x.$$

Ponieważ założyliśmy, że wieszaki rozłożone są w sposób ciągły



Rys. 621

i są nieodkształcone przeto łańcuch pod odciętą x również się obniży na tę samą wielkość Δy .

Zależność pomiędzy nieskończenie małym odcinkiem łańcucha o długości ds a współrzędnymi określa się wzorem:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2.$$

$$\begin{aligned} \text{Po odkształceniu otrzymamy: } ds \Delta ds &= dx \Delta dx + dy \Delta dy \text{ lub } \Delta dx = \\ &= \Delta ds \frac{dx}{ds} - \Delta dy \frac{dy}{ds}. \end{aligned}$$

Dla całego łańcucha zależność ta wyrazi się wzorem:

$$\int_0^l \Delta dx = \int_0^l \Delta ds \frac{ds}{dx} - \int_0^l \Delta dy \frac{dy}{dx}.$$

Ponieważ jednak punkty podwieszenia łańcucha są stałe, przeto

$$\int_0^l \Delta dx = 0 \text{ i } \int_0^l \Delta ds \frac{ds}{dx} = \int_0^l \Delta y \frac{dy}{dx}.$$

Oznaczmy przekrój łańcucha przez F , a współczynnik sprężystości materiału łańcucha przez E_0 .

W takim razie, jeżeli przez t_x oznaczymy naciąg łańcucha w przekroju (x, y) , to

$$\Delta ds = \frac{t_x}{F_x} \frac{ds}{E_0}, \text{ ale}$$

$\frac{t_x}{F_x} = \frac{H}{F_0}$, jak to zauważyliśmy na początku, więc

$$\begin{aligned} \Delta ds &= \frac{H}{F_0} \frac{ds}{E_0} \text{ i} \\ \int_0^l \Delta ds \frac{ds}{dx} &= \int_0^l \frac{H}{F_0 E_0} \frac{d^2 s}{dx} dx = \frac{H}{E_0 F_0} \int_0^l \frac{d^2 x + d^2 y}{dx} dx = \\ &= \frac{H}{E_0 F_0} \int_0^l (1 + y'^2) dx. \end{aligned} \quad [12]$$

Równanie krzywej łańcucha jest:

$$y = \frac{4f}{l^2} x(1-x) \text{ i } y' = \frac{4f}{l} - \frac{8f}{l^2} x,$$

stąd

$$\int_0^l (1 + y'^2) dx = \left(1 + \frac{16}{3} \frac{f^2}{l^2}\right) l;$$

w oparciu o wzór (12) możemy napisać:

$$\begin{aligned} \int_0^l \Delta ds \frac{ds}{dx} &= \frac{Hl}{E_0 F_0} \left(1 + \frac{16}{3} \frac{f^2}{l^2}\right) \text{ i} \\ \int_0^l \Delta dy \frac{dy}{dx} &= \left[y \frac{\Delta dy}{dx}\right]_0^l - \int_0^l y \frac{d^2 \Delta y}{dx^2} dx. \end{aligned}$$

Ponieważ przy $x = 0$ i przy $x = l$ $y = 0$, to

$$\int_0^l \Delta y \frac{dy}{dx} = - \int_0^l y \frac{d^2 \Delta y}{dx^2} dx, \text{ a mając } \frac{d^2 \Delta y}{dx^2} = - \frac{M_x}{EI},$$

wyprowadzimy wzór:

$$\int_0^l y \frac{d^2 \Delta y}{dx^2} dx = \int_0^l y \frac{M_x}{EI} dx = \frac{Hl}{E_0 F_0} \left(1 + \frac{16}{3} \frac{f^2}{l^2} \right). \quad [13]$$

Po wstawieniu $M_x = M'_x - Hy$ do wzoru (13) otrzymamy rozpór:

$$H = \frac{\frac{1}{EI} \int_0^l M'_x y dx}{\frac{1}{EI} \int_0^l y^2 dx + \frac{l}{E_0 F_0} \left(1 + \frac{16}{3} \frac{f^2}{l^2} \right)}.$$

Po scałkowaniu licznika i mianownika w założeniu, że mamy do czynienia tylko z jedną siłą P , zaczepioną w odległości a od podpory A , otrzymamy następujący wzór dla rozporu H :

$$H = \frac{5Pa(l-a)(l^2 - al + a^2)}{8l^3 \left[1 + \frac{15}{8} \frac{EI}{E_0 F_0} \frac{1}{f^2} \left(1 + \frac{16}{3} \frac{f^2}{l^2} \right) \right]}. \quad [14]$$

Według wzoru (14) możemy obliczyć rzędne linii wpływu rozporu mając F i I . Wielkości te znajdujemy sposobem stopniowych przybliżeń. Najpierw zakładamy, że pośrodku belki mamy przegub, tj. że przy

$$x = \frac{l}{2}, M'_{1/2} = M'_{1/2} - Hf = 0,$$

skąd otrzymamy:

$$H = \frac{M'_{1/2}}{f}.$$

To pierwsze przybliżenie wielkości rozporu umożliwia obliczenie momentu zginającego w przekroju np. $x = \frac{1}{3}$ oraz obliczenie I i F_0 . Wstawiając te wielkości od wzoru (14), możemy ściślej obliczyć H i nowe F_0 oraz I itd.

Wpływ zmiany temperatury. Przy zmianie temperatury długość łańcucha zmniejsza się lub zwiększa, co wpływa na zmianę rozporu H .

Mając moment gnący $M_x = H_1 y$ i wydłużenie łańcucha

$$\Delta ds = \frac{H_1}{E_0 F_0} ds + \alpha t ds, \text{ wyprowadzimy wzór:}$$

$$\begin{aligned} \int_0^l \Delta ds \frac{ds}{dx} &= \int_0^l \left(\frac{H_1}{E_0 F_0} \frac{d^2 s}{dx^2} \right) = \left(\frac{H_1}{E_0 F_0} + \alpha t \right) \left(1 + \frac{16}{3} \frac{f^2}{l^2} \right) l = \\ &= - \int_0^l \frac{H_1}{EI} y^2 dx = - \frac{8}{15} \frac{l^2}{EI} H_1, \end{aligned}$$

z którego otrzymamy wielkość rozporu:

$$H = - \frac{\alpha l E_o F_o}{1 + \frac{8f^2 E_o F_o}{15 EI \left(1 + \frac{16 f^2}{3 l^2}\right)}}.$$

Silę poprzeczną w belce obliczymy z równania:

$$\frac{dM'_x}{dx} = Q = \frac{dM_x}{dx} - H \frac{dy}{dx} = V_x - Htg\alpha,$$

gdzie V_x oznacza siłę poprzeczną w belce swobodnie podpartej na dwóch podporach.

Powyższe wzory można wyprowadzić z równania pracy sprężystej:

$$T = \int_0^l \frac{M_x^2 dx}{2EI} + \int_0^l \frac{t_x^2 ds}{2 E_o F_o}; \quad M_x = M'_x - Hy;$$

$$\frac{t_x}{F_o} = \frac{H}{F_o}; \quad F_x = F_o \frac{ds}{dx}; \quad t_x = H \frac{ds}{dx}; \quad \frac{dt_x}{dH} = \frac{ds}{dx}; \quad \frac{dM_x}{dH} = -y;$$

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dH} &= \frac{1}{EI} \int_0^l M_x \frac{dM_x}{dH} dx + \frac{H}{E_o F_o} \int_0^l \frac{d^2 s}{dx} = \\ &= \frac{1}{EI} \int_0^l (M'_x - Hy) y dx + \frac{H}{E_o F_o} \int_0^l \frac{d^2 s}{dx} = 0, \end{aligned}$$

skąd otrzymamy:

$$H = \frac{\frac{1}{EI} \int_0^l M'_x y dx}{\frac{1}{EI} \int_0^l y^2 dx + \frac{l}{E_o F_o} \left(1 + \frac{16 f^2}{3 l^2}\right)}.$$

Przy zmiennych momentach bezwładności belki usztywniającej, całki w granicach od 0 do l musielibyśmy rozbić na kilka odpowiednich całek lub zastąpić je sumami, jak to było wskazane przy rozpatrzeniu mostów łukowych dwuprzegubowych.

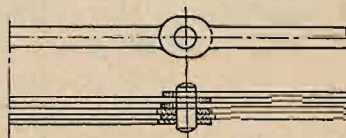
4. Konstrukcja łańcuchów mostów wiszących

Łańcuchy mostów wiszących mają różną konstrukcję zależnie od rozpiętości mostu i jego przeznaczenia.

W mostach dla pieszych, gdzie obciążenie jest stosunkowo nieduże i ciężar własny mostu również nie jest wielki, łańcuchy mogą być wykonane w postaci poszczególnych ogniów, odpowiednio do odległości pomiędzy wieżakami, którą przyjmuje się zwykle za jednakołą na całej rozpiętości mostu, tak że odległość ogniów łańcucha wzrasta od środka mostu ku podporom.

Najprostsza konstrukcja łańcucha pokazana jest na rysunku 622.

Każde ogniwo składa się z pręta o przekroju kwadratowym lub okrągłym, mającego na końcach otwory z odpowiednim wyrobieniem i wzmocnieniem,



Rys. 622

które zapewnia pracę całego przekroju pręta bez potraczeń na otwory lub osłabienia. Końce ogniwa muszą być wykute z pogrubionych końców prętów.

Połączenie ogniw ze sobą wykonuje się za pomocą krótkich ogniwek z bolcami rozdwojonymi, pośrodku których wstawione są kliny do regulowania długości łańcucha.

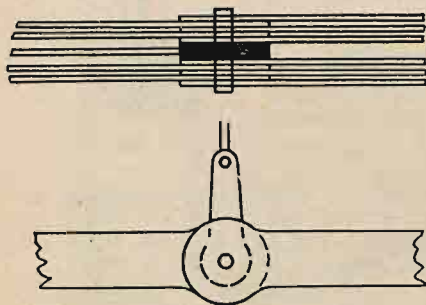
Jeżeli łańcuchy składają się z n elementów, to krótkie ogniwa mają $(n+1)$ elementów.

W łańcuchach liczba elementów w ogniwie długim jest jednakowa na całej rozpiętości mostu.

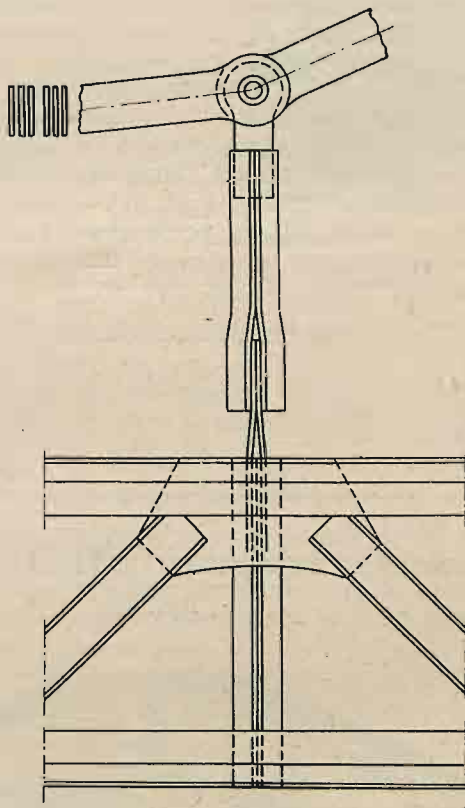
Pośrodku pomiędzy małymi elementami przez wolny otwór przechodzi wieszak z okrągłego pręta i z odpowiednią poprzeczką, ułożoną na małych ogniwach. Z wierzchu nakłada się ozdobę w postaci np. lwiej głowy lub inną

Na rys. 623 pokazany jest inny ustrój ogniwa, które może być wykonane z prętów-płaskowników z zaokrąglonymi końcami. Ogniwa tego typu wykonuje się ze stali miękkiej, która dobrze się spawa przy odpowiednim nagrzaniu końców. Połączenie ogniw ze sobą jest takie same, jak w ustroju przedstawionym na rys. 622.

Przy większych rozpiętościach łańcuchy są wykonane z blach stalowych grubości $12 \div 25$ mm, poszerzonych na końcach dla umieszczenia otworów, przez które przechodzą stalowe bolce (rys. 624).



Rys. 623



Rys. 624

Ponieważ każde ogniwo składa się z kilku blach, to aby długość ich, licząc pomiędzy środkami otworów, była jednakowa, blachy łączy się w jedną paczkę, po czym wierce się otwory. W ten sposób osiąga się dokładnie jednakową długość wszystkich elementów danego ogniwa, a przez to równomierną ich pracę w łańcuchu.

Wieszaki przytwierdza się do krótkich blach, mających takie same otwory, jak otwory w blachach łańcuchów. Blachy te są umieszczane pomiędzy elementami ogniw (rys. 624).

Liczba elementów łańcucha może być jednakowa we wszystkich ogniwach, a zmieniać się mogą tylko ich wymiary, lub liczba ich może wzrastać

o jeden element; przy tym grubość bocznych elementów może być mniejsza niż grubość środkowych. Zwiększenie o jeden element jest lepsze, gdyż wtedy w bolcach nie powstają momenty zginające, jak to widać z porównania rysunków 625 i 626.



Rys. 625

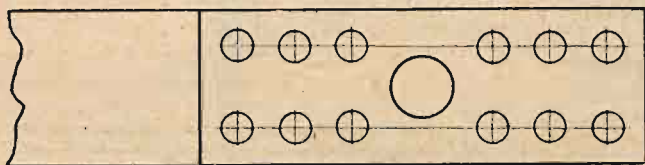


Rys. 626

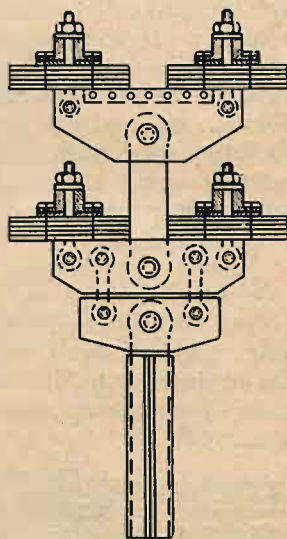
Przy jednakowej liczbie jednakowo naciągniętych elementów w dwóch sąsiednich ogniwach łańcucha powstaje moment w bolcu $4Pe$. Przy niejednakowej liczbie elementów w ogniwach moment jest równy zero, gdyż $e = 0$.

Wykonanie ogniw przedstawionych na rysunku 624 wymaga obróbki blach, jak wycinanie i heblowanie, co powoduje straty w materiale.

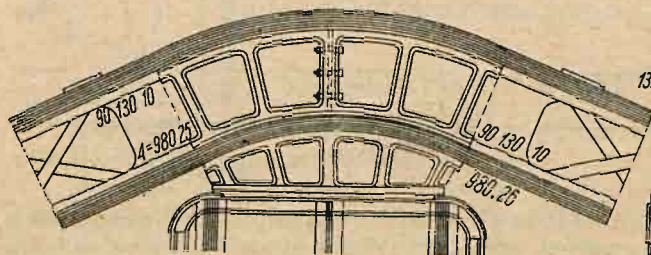
Aby uniknąć strat w materiale zaczęto stosować ogniwa z blach wzmocnionych na końcach dwustronnymi nakładkami tej samej szerokości, co i blacha zasadnicza, i takiej grubości, aby wyrównać osłabienie końca blachy przez otwór i stworzyć dostateczną grubość w otworze dla umieszczenia bolca na bezpośredni docisk (rys. 627).



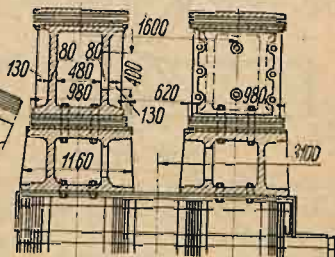
Rys. 627



Rys. 628



Rys. 629



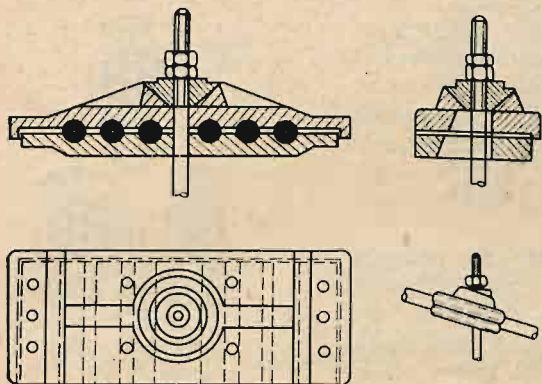
Nakładki połączone są z blachą nitami według obliczeń na siłę, jaka na nie działać. Główki nitów są wtopione i po znitowaniu zheblowane dla nadania nakładce gładkiej powierzchni.

Liczba blach w ogniwach zależy od rozpiętości mostu i obciążenia, a szerokość blach może dochodzić do 1500 mm.

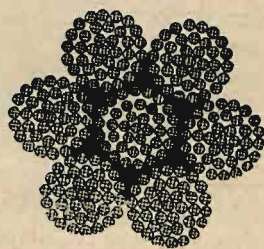
Średnica bolców jest różna i w zależności od wymiarów blach może wynosić do 600 mm.

Na ogół łańcuchy opisanej konstrukcji wypadają bardzo wielkich wymiarów i dlatego są ciężkie.

Na blachy łańcuchowe używa się stali o większej wytrzymałości granicznej, niż ją ma zwykła stal mostowa, mianowicie $55 \div 65 \text{ kG/mm}^2$ z wydłuże-



Rys. 630

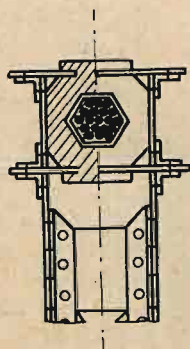


Rys. 631

niem $15 \div 18\%$ i granicą sprężystości 35 kG/mm^2 . Dopuszczalne naprężenie takiej stali przyjmuje się około 2200 kG/cm^2 .

Blachy w ogniach stawiane są na kant; odległość między nimi, zależnie od ich grubości, dochodzi do $40 \div 50 \text{ mm}$, co w pewnym stopniu utrudnia malowanie.

Łańcuchy mogą być również wykonane z blach znitowanych i położonych na płask (rys. 628).



Rys. 632

Blachy poziome, położone w pewnej odległości, mogą być znitowane ze sobą i usztywnione kątownikami, dzięki czemu łańcuchy stają się nieco sztywne. Łańcuchy składają się z dwóch gałęzi połączonych ze sobą kratką (rys. 629).

W mostach o bardzo dużych rozpiętościach zamiast łańcuchów stosuje się kable, które składają się z lin, liny zaś z drutów (rys. 630, 631, 632).

Liczba drutów w jednej linie dochodzi do 250 sztuk, a średnica drutów waha się od $3,5 \div 6,5 \text{ mm}$. Średnica kabla dochodzi do 900 mm.

Druty w linach są równoległe i przedzenie lin oraz kabli z przygotowanych drutów wykonywa się na miejscu budowy.

Najważniejszą rzeczą jest, aby oddzielne druty w linach i liny w kablach miały jednakowy naciąg.

Kabel wytworzony z lin jest bardzo mocno ściągnięty naokoło drutami i tak odizolowany powłoką, aby wilgoć nie mogła się przeciskać do drutów.

Liczba kabli w moście może wynosić od dwóch do dwunastu.

Na druty ciągnięte do kabli używa się stali niklowej tyglowej o wytrzymałości granicznej do 120 kG/mm^2 z wydłużeniem do 4% .

5. Podwieszenie wieszaków do łańcuchów

Sposoby połączenia wieszaków z łańcuchami w mostach niewielkich rozpiętości są pokazane na rysunku 622 i 623.

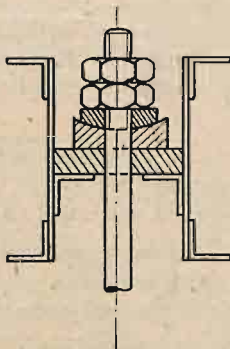
Wieszak powinien być tak połączony z łańcuchem, aby był tylko rozciągany a nie zginany, co może być osiągnięte przez podwieszenie przegubowo-kuliste (rys. 631 i 633) lub podwieszenie przegubowe w dwóch kierunkach prostopadłych do siebie (rys. 634).

Jeżeli dźwigar składa się z kilku łańcuchów, to podwieszenie wieszaków powinno być wykonane w taki sposób, aby wszystkie łańcuchy pracowały jednakowo. Przy dwóch gałęziach łańcucha siła od wieszaka powinna się przenosić na każdą gałąź po połowie, przy trzech — po jednej trzeciej itd. w założeniu, że wszystkie łańcuchy są jednakowego przekroju.

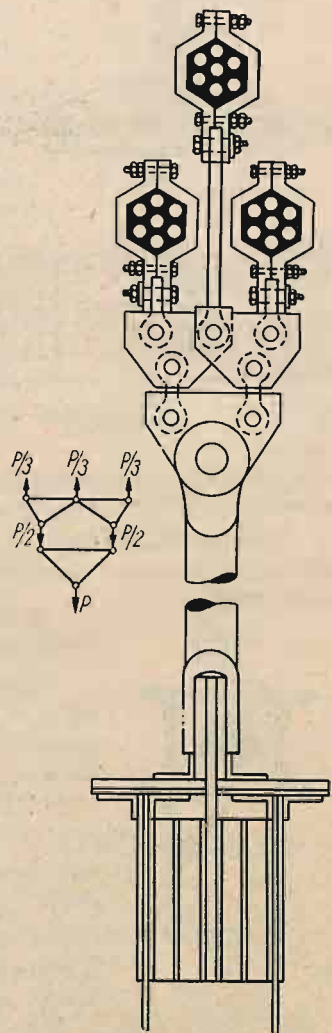
Takie połączenia wykonuje się za pomocą krótkich uchwytów, pokazanych na rys. 623 i 624 przy dwóch gałęziach płaskiego łańcucha, na rys. 634 przy trzech gałęziach łańcucha kablowego i na rys. 628 przy łańcuchu z czterech gałęzi, składających się z blach ułożonych na płask.

W pierwszym i ostatnim przypadku śruby pod naśrubkami mają podkładki kuliste. W blachach łańcuchowych otwory są przewiercone z pewnym luzem w stosunku do średnicy śruby, aby śruby mogły wykonywać niewielkie ruchy. Na podkładki kuliste nałożone są pokrywki (czapki) walcowe, aby wilgoć nie mogła przeniknąć z góry do otworów blach.

Na rys. 631 pokazane jest podwieszenie wieszaka do kabla. Kabel z sześciu jednostek ujęty jest przewiązkami i mocno zaciśnięty z góry i z dołu dwiema obręczami, osadzonymi w stanie nagrzanym na czopy pionowe przewiązek. Po ostygnięciu obręcze zaciskają przewiązki, a więc i kabel. Blachy pionowe, zawieszane na czopach poziomych, służą do przytwierdzenia wieszaków o przekroju dwuteowym. Blachy



Rys. 633



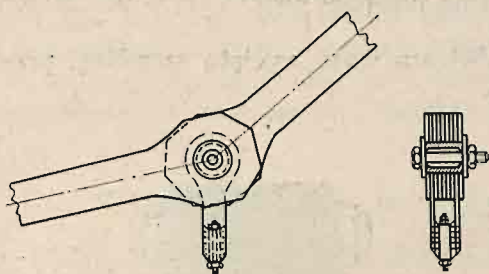
Rys. 634

te są wolno nałożone na czopy, tak że mogą się obracać w płaszczyźnie łańcucha.

Na rys. 634 pokazany jest sposób podwieszenia wieszaka do uchwytów i uchwytów do przewiązek, które zaciskają kable za pomocą śrub.

Mocne zaciśnięcie kabli kajdankami osiąga się w ustroju pokazanym na rys. 632, gdzie przewiązki mają z boku czopy, na których zawieszane są blachy do przynitowania wieszaków. Z boków przewiązek są pierścienie, które je zakrywają. W górnym czopie przewiązki jest otwór, przez który wlewa się

stop metalowy. Po zalaniu pustego miejsca między przewiązką a kablem na czopy nasadza się rozgrzane pierścienie stalowe, które po ostygnięciu i skurczeniu się dobrze zaciskają przewiązki.



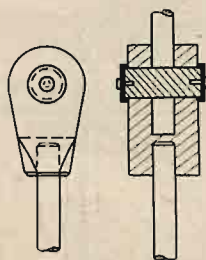
Rys. 635

Na rys. 635 pokazany jest inny sposób połączenia wieszaka z łańcuchem blaszanym.

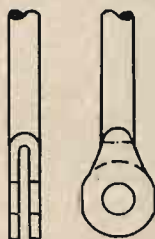
Należy zaznaczyć, że we wszystkich przypadkach wieszaki mogą się obracać w płaszczyźnie łańcucha w punkcie połączenia z łańcuchem, w dolnym zaś końcu obrót wieszaka jest zapewniony w płaszczyźnie prostopadłej do łańcucha.

Wieszaki wykonuje się z kształtowników, kątowników, ceowników i żelaza okrągłego (rys. 636).

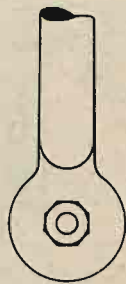
Wieszak z żelaza okrągłego jest zakończony albo widelkami z otworem na sworzeń (rys. 637), albo jest spłaszczony i w spłaszczonym końcu ma otwór na sworzeń (rys. 638), albo wieszak może być zakończony gwintem, na którym się trzyma w odpowiednim odlewie (rys. 636).



Rys. 636



Rys. 637



Rys. 638

6. Podwieszenie jezdni do wieszaków

Sposób podwieszania jezdni do wieszaków zależy do tego, czy most ma belkę usztywniającą, czy też jej nie ma. W ostatnim przypadku do wieszaków podwiesza się poprzecznice.

Przy belkach usztywniających wieszaki łączy się bezpośrednio ze słupkami lub z poprzecznicami, które są łączone na sztywno z belkami i usztywniającymi, gdyż wówczas na poprzecznicę przenosi się ciśnienie od belki usztywniającej.

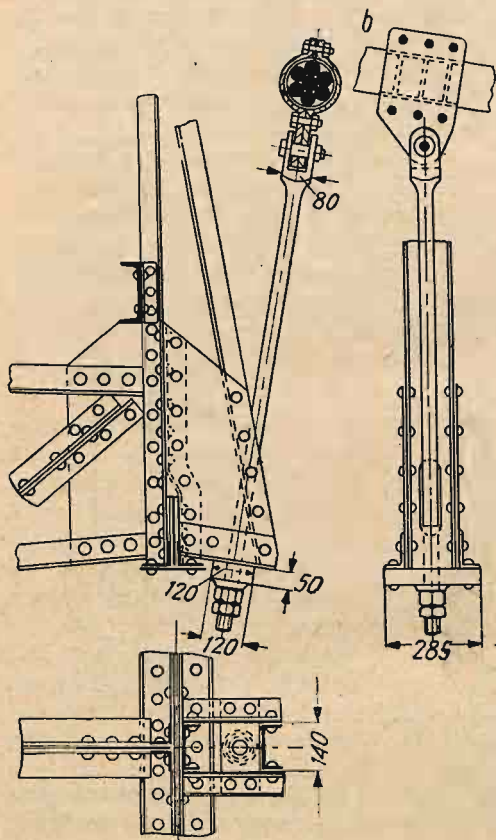
Na rys. 639 pokazane jest podwieszenie jezdni do wieszaka przy belce usztywniającej. Koniec poprzecznicy wypuszczony jest poza dźwigar usztywniający, ponieważ łańcuchy położone są w płaszczyźnie pochylej dla większej stateczności i sztywności mostu w płaszczyźnie poziomej. U dołu poprzecznicy umocowana jest poprzeczka, która podtrzymuje podkładki, tworzące przegub kulisty. W miejscu połączenia z łańcuchem wieszak ma przegub (boleć) pozwalający na niewielkie ruchy w płaszczyźnie łańcucha.

Inny sposób połączenia jezdni z wieszakami jest pokazany na rys. 640. Wieszaki są zaopatrzone w rurki z blachy, przez które przechodzą śruby po cztery na każdym końcu poprzecznicy. Rurki utrzymują belkę usztywniającą.

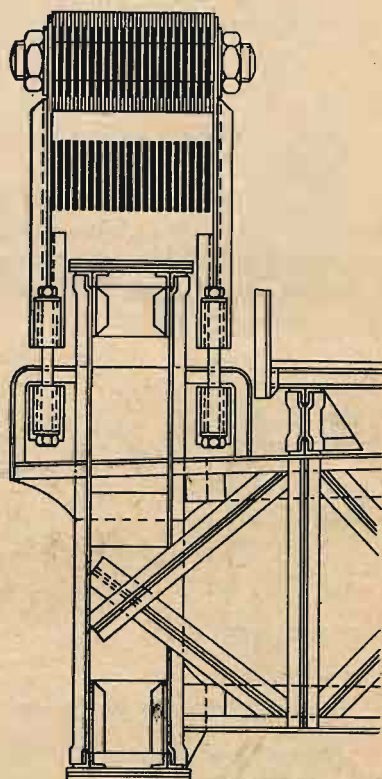
Inne rodzaje podwieszenia belek usztywniających pokazane są na rys 624, 633 i 634.

W podwieszeniu według rysunku 634 blacha przy belce usztywniającej jest rozwidlona i obejmuje z dwóch stron przeponę wstawioną w pas skrzynkowy belki usztywniającej.

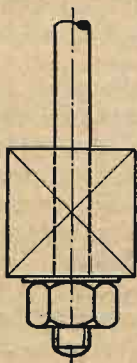
Blachy poziome pasa górnego dźwigara mają wyciętą szczelinę, przez którą przechodzi blacha do wieszaka.



Rys. 639



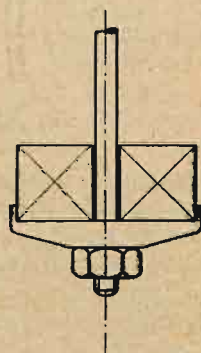
Rys. 640



Rys. 641



Rys. 642



Rys. 643

W mostach niewielkich rozpiętości, zwłaszcza w mostach dla pieszych, stosuje się jezdnię drewnianą. Zawieszenie drewnianych poprzecznic może być wykonane najprościej według rys. 641.

Wadą tego połączenia jest to, że w otworze, przez który przechodzi pręt wieszaka, belka zaczyna szybko gnić. Wówczas lepiej zawiesić belkę za pomocą strzemion, które obejmują poprzecznice (rys. 642 i 643).

Opisany sposób drewnianych poprzecznic jezdni z wieszakami może być zastosowany w razie użycia poprzecznic stalowych.

7. Podparcie łańcuchów na podporach

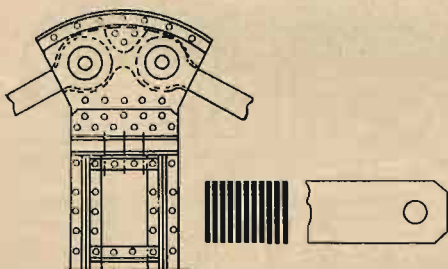
Podparcie łańcuchów na podporach zależy od ciśnienia, jakie łańcuch wywiera na podporę.

Przy niewielkich ciśnieniach, a więc przy małych rozpiętościach mostu i niewielkich obciążeniach, podparcie to może być wykonane na poduszkach nieruchomych, ustawionych na pilonach. Niewielki przesuw, który może powstać, odbywa się tarcie posuwistym lub za pośrednictwem wałków ułożonych pod poduszką.

Przy pilonach kamiennych najczęściej stosuje się poduszki na wałkach. Kształt poduszek zależy od ustroju łańcuchów.

Przy pilonach stalowych w postaci ramownic na fundamentach kamiennych, zamiast poduszek na wałkach, pilony ustawia się na przegubach tworząc podpory wahadłowe, łańcuch zaś u góry przytwierdza się do głowicy pilonów. Nieznaczne odchylenia pilonu umożliwiają kołysanie się łańcucha w dół i w poprzek.¹ Niekiedy łańcuch przytwierdza się na głowicy za pomocą bolców przechodzących przez specjalne poduszki z blach, które łączą łańcuch zawieszony z łańcuchami utrzymującymi.

W mostach o wielkich rozpiętościach ciśnienie na pilony jest tak duże, że jakikolwiek przesuw, czy to przy tarcu posuwistym, czy też potoczystym, jest wyłączony. Wałki musiałyby mieć bardzo duże średnice i być w znacznej ilości, aby przesuw mógł nastąpić. Umieszczenie wałków na głowicach pilonów wymagałoby dużo miejsca, a przeto i same pilony musiałyby być znacznych wymiarów.



Rys. 644

W tego rodzaju mostach, przeważnie kablowych, kable przechodzące przez głowice pilonów nie mogą się przesuwac. Pilony zaś przy wydłużaniu się lub kurczeniu kabli utrzymujących uginają się i w ten sposób umożliwiają przesuw kabli podwieszonych.

Podparcie łańcucha na pilonach zależy od konstrukcji łańcuchów. Jeżeli łańcuchy składają się z blach pionowych, to poduszkę wykonuje się również z blach pionowych, które tworzą jakby ogniwo łączące koniec łańcucha zawieszonego z końcem łańcucha utrzymującego. Poza obrębem blach pionowych umieszcza się przekładki nieco grubsze ($2 \div 3$ mm) od blach łańcuchów, aby łańcuchy miały wolny ruch, gdy poza ich obrębem poduszki będą mocno ściągnięte śrubami. Spód poduszki powinien być wyrównany heblem i dotykać dolnej płyty, którą łączy się śrubami z głowicą słupa pilonu wahadłowego (rys. 644).

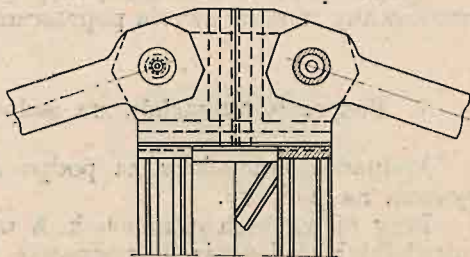
Na rys. 645 podany jest sposób połączenia łańcucha z pilonem wahadłowym przy użyciu łańcuchów ogniowych, a na rys. 646 przy zastosowaniu łańcuchów z blach pionowych, wzmoconych dwustronnymi nakładkami. Jeżeli łańcuch utworzony jest z blach położonych na płask (rys. 629), stosujemy poduszki stalowe w postaci odlewów z walcową powierzchnią, na której leżą blachy łańcucha. Promień walcowej powierzchni powinien być duży, aby w blachach, wygiętych na tej powierzchni, nie powstawały znaczne naprężenia. Każda z blach, z których się składa gałąź łańcucha, powinna być wygięta oddzielnie i dopiero po wygięciu wszystkich blach całość w stanie wygiętym podlega nitowaniu.

Jeżeli ciśnienie pozwala na zastosowanie wałków, to przerzucenie łańcuchów przez pilon może być wykonane według rys. 647.

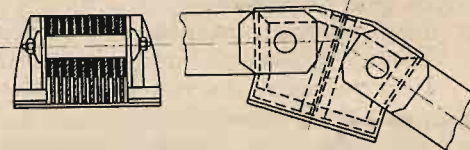
W mostach wiszących kablowych mogą zachodzić dwa przypadki przerzucania kabli przez pilony:

- 1) kabel podwieszony i kabel utrzymujący tworzą jedną całość lub
- 2) kabel podwieszony kończy się nad pilonem.

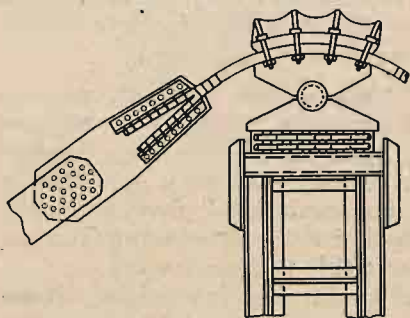
W pierwszym przypadku poduszka jest lana, odpowiednio zaokrąglona i ma wyżłobienie, w które wchodzi kabel. Poduszka jest albo nieruchomo połączona z głowicą stalowego pilonu wahadłowego (rys. 648), albo położona na wałki ustawione na płycie, która leży na nieruchomym pilonie kamiennym.



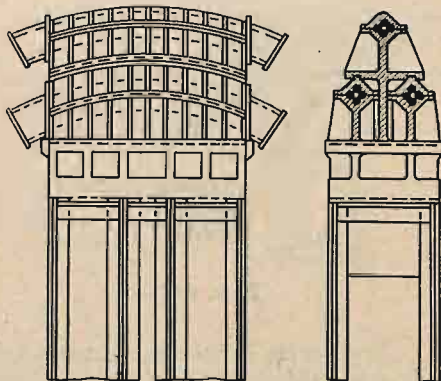
Rys. 645



Rys. 646



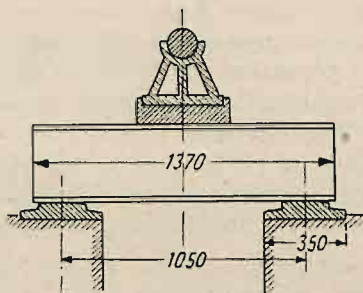
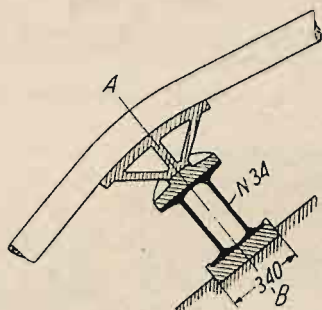
Rys. 647



Rys. 648

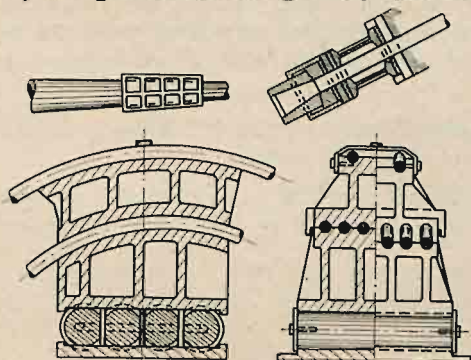
Przy pilonach kamiennych nie są wyłączone łożyska przegubowo-przesuwne, jak w mostach belkowych, z nadaniem odpowiedniego kształtu wahaczowi, na który przerzuca się kabel (rys. 647). W tym ustroju połączenia kabel utrzymujący składa się z kabla zasadniczego, który jest dalszym ciągiem kabla zawieszonego i dwóch kabli, przerzuconych na wahacz łożyska.

Wahacz jest tak nachylony w stronę kabla podwieszonego, że przy nacisku na przegub powstaje siła składowa pozioma, skierowana w stronę otworu mostu.



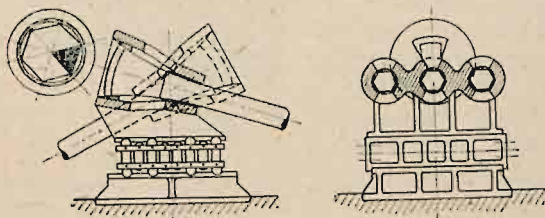
Rys. 649

Kable utrzymujące przegub mają za zadanie przeciwdziałać tej sile poziomej i nie pozwolić na przemieszczenie się wahacza, który mógłby całe łożysko przesunąć na głowicy pylonu. Proste przerzucenie kabla pojedynczego przez łożysko jest pokazane na rys. 649.

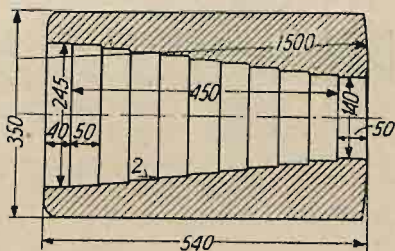


Rys. 650

Rysunki 650 i 651 przedstawiają przerzucenie kabli przez piony w przypadku, gdy kabel zakotwiczony nie jest dalszym ciągiem kabla podwieszonego. Kadłub specjalnego kształtu, oparty na wałkach (rys. 651), ma trzy otwory stożkowe. Przez te otwory przechodzą końce kabli, które są uformowane w kształt stożkowy. Aby wytworzyć kształt stożkowy, końce kabla rozplata się, druty oczyszcza się kwasem solnym, a pomiędzy druty wkłada się



Rys. 651



Rys. 652

gwoździe klinowe i następnie zalewa stopem z ołowiu, cyny i antymonu. Tak wytworzony stożkowy koniec kabla zaciska się w otworze stożkowym kadłuba. Do zamocowania kabla pojedynczego może służyć odlew stożkowy, pokazany na rys. 652.

8. Umocowanie łańcuchów kotwicznych

Łańcuchy mostowe zakotwia się w murach odpowiedniej objętości i ciężaru. W miejscach, w których ciśnienie na mur od poduszek łańcuchów kotwicznych działa bezpośrednio, mur powinien być odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie i na rozerwanie, a z uwagi na działanie w tych miejscach momentów zginających, również i na rozciąganie. Łańcuchy muszą przechodzić przez kanały dostępne dla kontroli urządzenia.

W mostach o niewielkich rozpiętościach można łańcuchy kotwiczne umieszczać bezpośrednio w murze.

Ciśnienie od łańcuchów kotwicznych przenosi się na mur za pośrednictwem ciosów kamiennych lub dobrze uzbrojonego betonu, na którym leżą poduszki lub płyty stalowe.

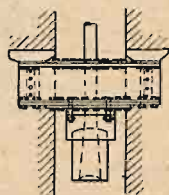
Ciśnienie od poduszek łańcuchów kotwicznych należy przenieść na mur przez kilka ciosów, z wyjątkiem mostów o niewielkich rozpiętościach, gdzie ciśnienie to można przenieść na dwa ciosy podporowe.

W mostach o większych rozpiętościach ciśnienie przenosi się przez odpowiednio silne belki na cztery lub nawet osiem ciosów podporowych.

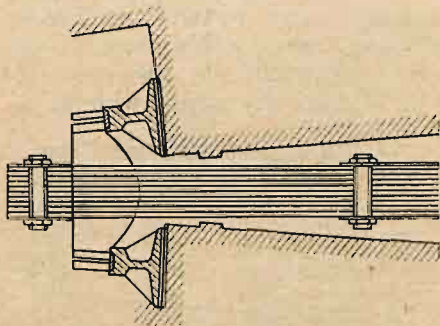
Na rys. 653 pokazane jest zakotwienie łańcucha; przez specjalną poduszkę mniej więcej tego samego ustroju jak poduszka na pilonie przenosi się siłę naciągu na belki odlane, leżące na czterech poduszkach, które przekazują ciśnienie ciosom podporowym.

Na rys. 654 podany jest inny przykład zakotwienia łańcucha; siła naciągu przenosi się przez łożyska stalowe na ciosy podporowe.

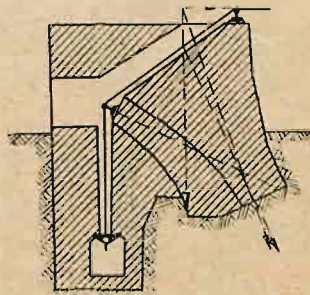
W miejscach załamania łańcuchów kotwicznych w murach powinny być umieszczone poduszki stalowe, aby łańcuch cisnął na poduszkę, a ta dopiero na ciosy muru (rys. 655).



Rys. 653



Rys. 654



Rys. 655

W celu zmniejszenia wymiarów poduszek można zakończyć łańcuchy kotwiczne dwiema lub czterema gałęziami.

Łańcuch składa się z czterech gałęzi z blach na płask położonych i na końcach rozgałęzia się w ten sposób, że każda gałąź przenosi ciśnienie na dwie poduszki; w wyniku całe ciśnienie przenosi się na osiem ciosów podporowych.

WSPÓŁCZESNE DROGI ROZWOJU MOSTÓW WISZĄCYCH I WSPÓŁCZESNE METODY OBLICZANIA MOSTÓW WISZĄCYCH

1. Współczesne drogi rozwoju mostów wiszących

W rozwoju mostów wiszących wyodrębniają się dwa kierunki. Jeden z nich, charakterystyczny przede wszystkim dla Stanów Zjednoczonych A. P., polega na ulepszaniu za pomocą najrozmaitszych środków podstawowego typu mostu wiszącego, który można określić mianem dwulańcuchowego (po jednym w każdym dźwigarze płaskim) i który jest najprostszą postacią mostu wiszącego.

Drugi kierunek, reprezentowany przez ZSRR, polega na stosowaniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych w postaci mostów wiszących czterolańcuchowych (po dwa łańcuchy w każdym dźwigarze płaskim) oraz mostów wantowych *).

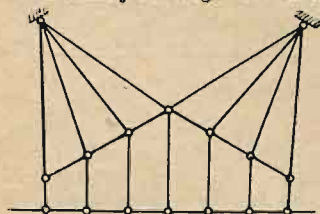
Wyższość drugiego kierunku w porównaniu z pierwszym, pomijając doświadczenie w wielkiej skali, jakim była katastrofa mostu wiszącego w Tacoma, staje się oczywista, gdy się weźmie pod uwagę wyniki teoretycznych badań naukowych, stwierdzające, że mosty wiszące dwulańcuchowe są mało stateczne pod względem aerodynamicznym, podczas gdy mosty wiszące czterolańcuchowe i mosty wantowe są bardzo stateczne.

Oprócz tej podstawowej zalety mosty wantowe i mosty wiszące czterolańcuchowe są znacznie ekonomiczniejsze od mostów wiszących starego typu.

Trzeba dodać, że wielkie znaczenie dla dalszego rozwoju mostów wiszących ma rozwiązanie radzieckiego profesora N. S. Streleckiego, który w r. 1945 opracował naukowo nowy typ wieloprzęsłowego mostu wiszącego z przyczółkami-wahaczami. Ten typ mostu powinien znaleźć zastosowanie jako niezwykle ekonomiczne rozwiązanie przy przekraczaniu szerokich nizinnych rzek.

Jak wiadomo, pokonywanie tego rodzaju przeszkód za pomocą mostów wiszących nie było dotychczas w ogóle brane pod uwagę, jako *a priori* „niewłaściwe“.

a. Definicja dźwigara wantowego



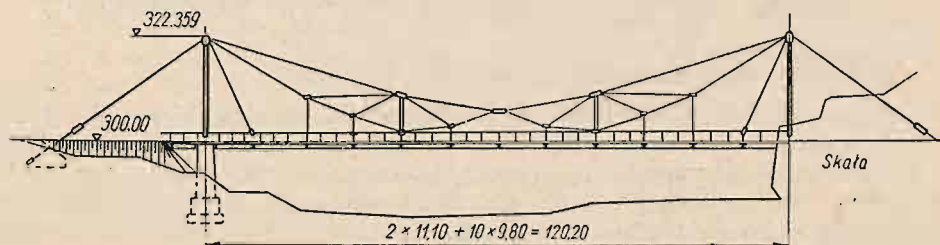
Rys. 656

Dźwigar wantowy jest to taki geometrycznie niezmienny ustrój prętowo-przegubowy, w którym wszystkie pręty są rozciągane. „Idealny“ dźwigar wantowy, tj. taki, w którym przy dowolnym położeniu ciężaru ruchomego wszystkie pręty są rozciągane, jest pokazany na rys. 656.

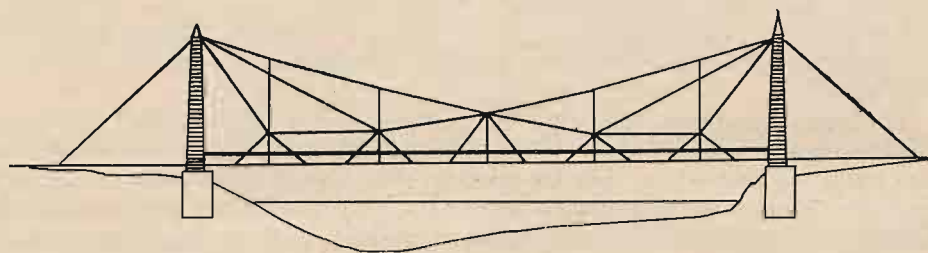
Oczywiście, biorąc pod uwagę fakt istnienia określonego ciężaru własnego mostu, nie jest rzeczą konieczną stosowanie wyłącznie „idealnych“ dźwigarów wantowych; można zaprojektować wiele odmian tych dźwigarów, przy zachowaniu warunku, aby pod łącznym wpływem ciężaru własnego

*) Zagadnienie stateczności aerodynamicznej mostów wiszących i nowe racjonalne formy konstrukcyjne mostów wiszących oraz pokrewnych typów są szczegółowo omówione w książce S. A. Caplina „Wiszące mosty“ Moskwa, Dorizdat 1949 r.

i obciążenia ruchomego nie powstawały w żadnym przecie siły ściskające. Na rysunkach 657 i 658 są podane przykłady mostów wantungowych, zaprojektowanych przez inżynierów radzieckich Rosnowskiego i Krylcowa.



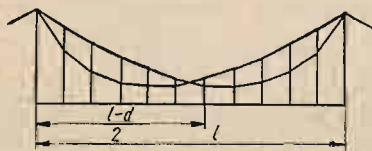
Rys. 657



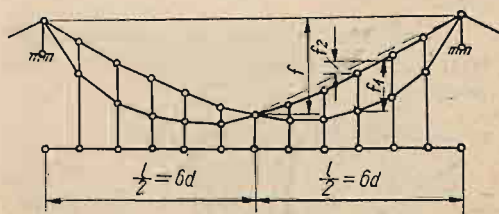
Rys. 658

b. Mosty wiszące czterolancuchowe

Mosty wiszące czterolancuchowe należą, jak już wspomniano, również do ustrojów statecznych pod względem aerodynamicznym. Ze względu na pewną różnicę w pracy ustroju rozróżnić tu można mosty wiszące czterolancuchowe bez środkowego wieszaka (rys. 659) i mosty wiszące czterolancuchowe ze środkowym wieszakiem (rys. 660).



Rys. 659



Rys. 660

2. Współczesne metody obliczania mostów wiszących

Biorąc pod uwagę fakt, że momenty zginające w belce usztywniającej mostów wiszących, statycznie niewyznaczalnych, są różnicą $M\alpha^0 - Hy$ i wielkość ich w stosunku do $M\alpha^0$ wynosi zaledwie kilka procent, zrozumiałą jest wielki wpływ, jaki mają odkształcenia na siły wewnętrzne w konstrukcji. Z tego też względu przy obliczaniu mostu wiszącego należy zrezygnować z zasady zeszywnienia i obliczać siły wewnętrzne z uwzględnieniem zmian, jakim ulegają ramiona momentów sił zewnętrznych pod wpływem odkształceń ustroju.

Prowadzi to, rzecz jasna, do znacznych oszczędności na materiale belki usztywniającej (y zwiększa się, więc moment zginający w belce maleje).

Niżej podajemy szczegółowy tok obliczenia jednoprzęsłowego mostu wiszącego, jednokrotnie statycznie niewyznaczalnego, według S. A. Caplina *).

Równanie osi łańcucha — parabola 2 stopnia.

Oznaczając całkowity rozpór w łańcuchu (składowa poziomej siły w łańcuchu) przez H_x , można napisać:

$$H_x = H_p + H_q,$$

gdzie: H_q — rozpór od ciężaru własnego,

H_p — rozpór od obciążenia ruchomego.

Dalej oznaczając przez y rzędną łańcucha mierzoną od osi poziomej, przechodzącej przez wierzchołek pylonu, a przez η dodatkowe obniżenie się łańcucha pod wpływem ugięcia belki, otrzymamy następujące wyrażenie na moment zginający w belce:

$$M_x = M_x^0 - H_p (y + \eta) - H_q \eta, \quad [15]$$

a równanie różniczkowe odkształconej osi belki

$$EI \frac{d^2 \eta}{dx^2} = -M_x. \quad [16]$$

Różniczkując dwukrotnie równanie (15) otrzymamy:

$$EI \frac{d^4 \eta}{dx^4} - H_x \frac{d^2 \eta}{dx^2} = p(x) + H_p \frac{d^2 y}{dx^2}, \quad [17]$$

gdzie: $H_x \frac{d^2 \eta}{dx^2}$ — dodatkowe obciążenie przejmowane przez łańcuch i wywołane odkształceniami,

$p(x)$ — obciążenie zewnętrzne ruchome,

$H_p \frac{d^2 y}{dx^2}$ — obciążenie przejmowane przez łańcuch.

Zakładając η w postaci nieparzystego szeregu Fourier w przedziale od 0 do l

$$\eta = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{n\pi x}{l}$$

i wobec równania łańcucha

$$y = \frac{4fx}{l} - \frac{4fx^2}{l^2},$$

znajdziemy, że

$$\frac{d^2 \eta}{dx^2} = - \sum_{n=1}^{\infty} b_n \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \sin \frac{n\pi x}{l}; \quad \frac{dy}{dx} = \left(\frac{4f}{l} - \frac{8fx}{l^2} \right) \frac{d^2 y}{dx^2} = - \frac{8f}{l^2},$$

$$\frac{d^4 \eta}{dx^4} = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \frac{n^4 \pi^4}{l^4} \sin \frac{n\pi x}{l}.$$

*) S. A. Caplin: Wisiacze mosty, Dorizdat, Moskwa 1949 r.

Podstawiając odpowiednie wartości do równania (17) i po rozłożeniu obciążenia p na długości b i w odległości a od lewej podpory w szereg Fourier otrzymamy:

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n EI \frac{n^4 \pi^4}{l^4} + H_x \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \sin \frac{n\pi x}{l} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{n\pi} p \cdot \sin \frac{n\pi(2a+b)}{2l} \sin \frac{n\pi b}{2l} \sin \frac{n\pi x}{l} - H_p \frac{8f}{l^2}.$$

Wobec tego, że $\int_0^l \sin \frac{n\pi x}{l} \sin \frac{m\pi x}{l} dx = 0$ przy $m \neq n$, a przy $m = n$, jest równa $\frac{l}{2}$, otrzymamy stosując ogólną metodę wyznaczania współczynników w szeregach Fourier:

$$b_i = \frac{4p \sin \frac{i\pi(2a+b)}{2l} \sin \frac{i\pi b}{2l} + \frac{16f}{l^2} H_p (\cos i\pi - 1)}{\frac{i^5 \pi^5}{l^4} + H_x \frac{i^3 \pi^3}{l^2}} \quad [18]$$

$$\text{i } \eta = \sum_{i=1}^{\infty} b_i \sin \frac{i\pi x}{l}.$$

Aby znaleźć ugięcie pod wpływem temperatury t , należy w wyrażeniu na b_i , — p przyrównać do zera, a zamiast H_p podstawić H_t .

Aby znaleźć wielkość η , tj. wyznaczyć moment zginający M w belce usztywniającej, konieczne jest określenie rozporów wchodzących do wyrażenia na b_i .

Rozpór od ciężaru własnego H_q łatwo można obliczyć ze wzoru:

$$H_q = \frac{ql^2}{8f},$$

gdyż montaż mostu wykonuje się w taki sposób, aby belka usztywniająca nie pracowała na ciężar własny konstrukcji. Osiąga się to przez ustawienie podpór belki usztywniającej dopiero w ostatniej fazie montażu, tj. wtedy, gdy całkowity ciężar własny jest już przejęty przez łańcuchy.

W ten sposób pozostaje do wyznaczenia w wyrażeniu na b_i tylko rozpór H_p , gdyż $H_x = H_q + H_p$.

Rozpór ten można wyznaczyć z następującego równania, wyrażającego warunek niezmienniej odległości między punktami zakotwienia łańcucha:

$$\frac{H_p \cdot L_s}{EA_l} \pm EtL_l - \int \frac{d\eta}{dx} \frac{dy}{dx} dx = 0, \quad [19]$$

$$\text{gdzie } L_s = \left(1 + \frac{8f^2}{l^2}\right) + 2s \sec^2 \alpha^0,$$

przy czym: l — rozpiętość mostu między osiami pylonów,

f — strzałka łańcucha,

s — długość liny kotwiącej,

α^0 — kąt, jaki tworzy lina kotwiąca z poziomem,

$$L_l = \int \frac{dx}{\cos^2 \eta}.$$

przy czym q — kąt nachylenia łańcucha do poziomu,
 A — pole przekroju poprzecznego łańcucha,
 t — różnica temperatur w stopniach,
 E — moduł Younga materiału łańcucha.

Podstawiając do ostatniego wyrazu równania znalezione poprzednio wartości, otrzymamy:

$$\int_0^l \frac{d\eta}{dx} \frac{dy}{dx} dx = - \frac{8f}{l} \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{4p \sin \frac{i\pi(2a+b)}{2l} \sin \frac{i\pi b}{2l}}{E \frac{i^6 \pi^6}{l^4} + H \frac{i^4 \pi^4}{l^2}} + \right. \\ \left. + \frac{\frac{16f}{l^2} H_p (\cos i\pi - 1)}{E \frac{i^6 \pi^6}{l^4} + H \frac{i^4 \pi^4}{l^2}} \right) \cdot (\cos i\pi - 1).$$

W wyrażeniu tym tylko nieparzyste wyrazy są różne od zera.

Oprócz tego należy zauważyć, że jest to szereg szybkozbieżny, gdyż określa się współczynnikiem $\frac{1}{i^6}$.

Pomijając przeto wszystkie wyrazy z wyjątkiem pierwszego (trzeci wyraz stanowi tylko 0,2% pierwszego) otrzymamy:

$$\int_0^l \frac{d\eta}{dx} \frac{dy}{dx} dx = \frac{16f}{l} \frac{4p \sin \frac{\pi(2a+b)}{2l} \sin \frac{\pi b}{2l} - \frac{32}{l^2} H_p}{EI \frac{\pi^6}{l^4} + H \frac{\pi^4}{l^2}},$$

a równanie (19) przybiera postać

$$\frac{H_p \cdot L_s}{EA_l} \pm EtL_l - \frac{\frac{16f}{l} 4p \sin \frac{\pi(2a+b)}{2l} \sin \frac{\pi b}{2l} - \frac{32f}{l^2} H_p}{EI \frac{\pi^6}{l^4} + H \frac{\pi^4}{l^2}} = 0. \quad [20]$$

Jak widać, jest to równanie drugiego stopnia względem H_p .

Określiwszy H_p łatwo jest znaleźć momenty i siły działające w belce usztywniającej, posługując się wyżej przytoczonymi wzorami.

Na zakończenie warto przypomnieć, że w wyniku odrzucenia zasady zeszytnienia nie wolno w danym przypadku stosować zasady superpozycji (dodawania sił i odkształceń), co pociąga za sobą z kolei niemożność sporządzenia jakichkolwiek linii wpływowych. Siły w poszczególnych elementach konstrukcji powinny być obliczone dla pewnego określonego położenia obciążenia ruchomego i dla pewnej określonej wielkości tego obciążenia (tzn. nie wolno tutaj posługiwać się obciążeniami jednostkowymi).

3. Obliczenia statyczne mostów wantungich i mostów wiszących czteropiętrowych

Jeśli chodzi o obliczenia statyczne mostów wantungich, to nie nastroją one żadnych trudności, gdyż z zasady projektuje się je jako ustroje statycznie wyznaczalne. Nadto nie mają one belki usztywniającej i wskutek

tego obliczenie ich sprowadza się do wyznaczenia linii wpływowych w poszczególnych wantach (linach).

Wyznaczanie linii wpływowych rozpoczynamy analogicznie do porządku obliczeń łuków trójp przegubowych, tj. od wyznaczenia linii wpływowej rozporu.

Należy jedynie zwrócić uwagę na fakt, że linie wpływowe sił w niektórych wantach wypadają różnznacne, tzn. mają dodatnie i ujemne gałęzie. W tych przypadkach należy sprawdzać, czy pod wpływem najniekorzystniejszego obciążenia nie mogą powstać w wantach siły ściskające. Jeżeli okaże się, że przypadek taki jest możliwy, należy oczywiście zmienić zarys geometryczny dolnego pasa dźwigara wantowego.

Powstanie sił ściskających w wantach jest równoznaczne z utratą geometrycznej niezmienności ustroju, gdyż wobec tego, że liny, jako elementy wiotkie, nie mogą pracować na ściskanie, pojawienie się ściskania w którejkolwiek linie jest równoważne odrzuceniu jednego pręta z ustroju, a więc odzyskaniu jednego stopnia swobody, co jest niedopuszczalne.

Oprócz tej jakościowej charakterystyki zagadnienia trzeba tu oczywiście podać także kryterium ilościowe, tj. minimalny liczbowy stosunek siły rozciągającej w danym wancie pod wpływem ciężaru stałego — do siły ściskającej pod wpływem obciążenia ruchomego.

Oznaczając pole dodatnie, odpowiadające rozciąganiu linii wpływowej siły w danym wancie przez Ω_1 ,
a pole ujemne przez Ω_2' ,
dalej przez q — natężenie równomiernie rozłożonego ciężaru własnego,
przez p — natężenie równomiernie rozłożonego obciążenia ruchomego,

można powyższy stosunek wyrazić w postaci:

$$\alpha = \frac{q (\Omega_1 - \Omega_2)}{p \Omega_2} \quad [21]$$

Warunkiem dostatecznego bezpieczeństwa dźwigara wantowego pod względem jego geometrycznej niezmienności jest

$$\alpha \geq 1,5. \quad [22]$$

Jeżeli chodzi o obliczenia statyczne mostów wiszących czterolancuchowych, to najczęściej polegają one na obliczeniu ustroju jedno- lub dwukrotnie statycznie niewyznaczalnego, przy czym obliczenia przeprowadza się w oparciu o zasadę zeszytywnienia zwykłą metodą sił.

4. Drgania własne mostów wiszących

Obliczenie częstotliwości drgań własnych mostu wiszącego ma duże znaczenie, gdyż z jednej strony pozwala ocenić jego przydatność ze względu na działanie obciążenia ruchomego, z drugiej zaś strony pozwala sądzić o jego stateczności pod względem aerodynamicznym.

a. Drgania własne dwulancuchowego mostu wiszącego

Zakładamy, iż odkształcenie wieszaków może być pominięte, co jest równoznaczne z przyjęciem, że ugięcie łańcucha w każdej chwili jest równe ugięciu belki usztywniającej.

Nadto przyjmujemy, że rozpiętość łańcucha jest równa rozpiętości belki usztywniającej, tzn. że podpory obu tych elementów leżą na tych samych pionach.

Wprowadzamy następujące oznaczenia:

q — ciężar własny dźwigara równomiernie rozłożony na całej długości przęsła,

H_{st} — rozpór od obciążenia statycznego.

Sila bezwładności wyraża się wzorem:

$$U_x = -\frac{q}{g} \frac{d^2 \eta}{dt^2}, \quad [23]$$

gdzie: η — ugięcia konstrukcji przy drganiach (mierzone od osi odkształconej pod wpływem obciążenia statycznego),

g — przyspieszenie ziemskie.

Oprócz tego zakładamy, że:

1) belka usztywniająca i część przejazdowa są swobodnie podwieszone do łańcucha, tj.:

$$H_{st} \frac{d^2 y}{dx^2} = -q,$$

2) amplitudy drgań są małe, tzn. że podczas drgań obciążenie łańcucha jest stale i równe:

$$H_{st} \frac{d^2 (y + \eta)}{dx^2} = H_{st} \frac{d^2 y}{dx^2} + H_{st} \frac{d^2 \eta}{dx^2} = -h, \quad [24]$$

gdzie: h — dodatkowe obciążenie przęsła, spowodowane drganiami i równomiernie rozłożone na całej długości przęsła.

To ostatnie założenie upraszczające daje niewielki błąd i nie wpływa na wielkość amplitud w przypadku, gdy drgania mają postać parzystej liczby półfal.

Warunek równowagi elementu belki usztywniającej można napisać w postaci:

$$q = u + v + h,$$

gdzie v — obciążenie przejmowane przez belkę.

Różniczkowe równanie drgań przybierze postać:

$$EI \frac{d^4 \eta}{dx^4} - H_{st} \frac{d^2 \eta}{dx^2} + \frac{q}{g} \frac{d^2 \eta}{dt^2} = 0, \quad [25]$$

gdzie EI — sztywność belki usztywniającej.

Zgodnie z założeniami rozpór H_{st} , wchodzący do równania, traktujemy jako współczynnik stały.

Ponieważ dowolne drgania harmoniczne można przedstawić w postaci nieskończonego szeregu sinusoid, funkcję $\eta(x, t)$ można przyjąć w postaci szeregu Fourier:

$$\eta(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n(t) \sin \frac{n\pi x}{l},$$

którego współczynniki

$$\eta_n(t) = \frac{2}{l} \int_0^l \eta(x, t) \sin \frac{n\pi x}{l} dx$$

zależą od t (różnica temperatur w stopniach).

Przyjęty szereg spełnia warunki brzegowe zadania, gdyż dla $x = 0$ i $x = l$ $\eta(x, t) = 0$.

Podstawiając wyrażenie na $\eta(x, t)$ do równania [25] otrzymamy:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \eta_n(t) \left[EI \frac{n^4 \pi^4}{l^4} + H_{st} \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \right] \sin \frac{n\pi x}{l} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q}{g} \eta''_n(t) \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} = 0.$$

Mnożąc ostatnie równanie przez $\sin \frac{n\pi x}{l}$ i całkując w granicach od 0 do l , otrzymamy:

$$\left(EI \frac{n^4 \pi^4}{l^4} + H_{st} \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \right) \eta_n(t) + \frac{q}{g} \cdot \eta''_n(t) = 0. \quad [26]$$

$$\text{Oznaczając } \omega_n^2 = \frac{q}{g} \left(EI \frac{n^4 \pi^4}{l^4} + H_{st} \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \right),$$

równanie (26) możemy napisać w postaci:

$$\eta''_n(t) + \omega_n^2 \eta_n(t) = 0.$$

Całka ogólna tego równania

$$\eta_n(t) = A \sin \omega_n t + B \cos \omega_n t,$$

skąd przy warunkach początkowych

$$t = 0, \eta_n(t) = \eta_0 \text{ i } \eta'_n(t) = 0$$

otrzymamy:

$$\eta_n(t) = \eta_0 \cos \omega_n t.$$

Częstotliwość drgań własnych równa się:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{EI \frac{n^4 \pi^4}{l^4} + H_{st} \frac{n^2 \pi^2}{l^2}}{m}}, \quad [27]$$

$$\text{gdzie } m = \frac{q}{g}.$$

b. Drgania własne mostu wiszącego czterolaneuchowego

Rozpatrując drgania własne mostu czterolaneuchowego przy tych samych założeniach co i mostu dwulaneuchowego i wprowadzając oznaczenia:

H_{st} — rozpór całkowity obliczony statycznie,

H_1 — rozpór w łańcuchu dolnym,

H_2 — rozpór w łańcuchu górnym,

q — natężenie ciężaru własnego równomiernie rozłożonego.

A_0 — składowa pionowa reakcji łańcuchów, A_1 — j. w. belki usztywniającej,

otrzymamy jako warunek równowagi element belki usztywniającej:

$$\begin{aligned} \sum M_A = (A_1 + A_0) x + \int_0^x \int_0^x q dx dx - H_{st} (y_2 + \eta) + H_1 (y_2 - y_1) - \\ - \int_0^x \int_0^x u dx dx = 0; \end{aligned} \quad [28]$$

po dwukrotnym zróżniczkowaniu otrzymamy:

$$-q - H_{st} \frac{d^2 y_2}{dx^2} + H_1 \frac{d^2 y_2}{dx^2} - H_1 \frac{d^2 y_1}{dx^2} - H_{st} \frac{d^2 \eta}{dx^2} \cdot \\ \cdot \frac{q}{g} \frac{d^2 \eta}{dt^2} + EI \frac{d^4 \eta}{dx^4} = 0. \quad [29]$$

Ale jeśli przed wystąpieniem drgań belka usztywniająca i część przejazdowa były swobodnie podwieszone do łańcucha, to musi być spełnione równanie:

$$-q - H_2 \frac{d^2 y_2}{dx^2} - H_1 \frac{d^2 y_1}{dx^2} = 0.$$

Oczywista jest również zależność

$$H_{st} = H_1 + H_2.$$

Po wstawieniu tych zależności do równania (29) otrzymamy:

$$EI \frac{d^4 \eta}{dx^4} - H_{st} \frac{d^4 \eta}{dx^2} + \frac{q}{g} \frac{d^4 \eta}{dt^2} = 0. \quad [30]$$

a więc równanie analogiczne do poprzednio wyprowadzonego równania dla mostu dwułańcuchowego.

Wynik ten tłumaczy się faktem nieuwzględniania rozporu dynamicznego. W tych warunkach częstotliwość drgań własnych mostu czterułańcuchowego obliczymy ze wzoru:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{EI \frac{n^4 \pi^4}{l^4} + H_{st} \frac{n^2 \pi^2}{l^2}}{m}}. \quad [31]$$

5. Ocena stateczności aerodynamicznej mostu dwułańcuchowego i mostu czterułańcuchowego

Wyżej wyprowadzony wzór wskazywałby na to, że obydwie ustroje, tzn. dwułańcuchowy i czterułańcuchowy, znajdują się w analogicznych warunkach, jeśli chodzi o drgania i stateczność aerodynamiczną. W rzeczywistości tak nie jest, a to wskutek tego, że podczas drgań powstają dodatkowe siły wewnętrzne. Aby określić te siły, należy przyjąć jakąś skończoną, z praktyki wziętą wielkość amplitudy.

Zbadanie stateczności aerodynamicznej sprowadza się do wyznaczania rozporu dynamicznego.

Ponieważ odległość pomiędzy punktami zakotwienia łańcucha jest niezmienna, musi być spełnione równanie:

$$\int \frac{H ds}{EA \cos^2 \varphi} - \int \frac{d\eta}{dx} \frac{dy}{dx} dx = 0, \quad [32]$$

ale

$$\int \frac{H ds}{EA \cos^2 \varphi} = \frac{HL_s}{EA},$$

$$L_s = \left(1 + \frac{8f^2}{l^2}\right) + 2s \sec^2 \alpha^0,$$

gdzie s — długość linii kotwiącej,
 α^0 — kąt nachylenia liny kotwiącej do poziomu oraz

$$\int \frac{d\eta}{dx} \frac{dy}{dx} dx = - \int \eta \frac{d^2 y}{dx^2} dx. \quad [33]$$

Podstawiając otrzymane wartości do równania (32) będziemy mieli:

$$\frac{HL_s}{EA} + \int \eta \frac{d^2 y}{dx^2} dx = 0. \quad [34]$$

Pionowe drgania mostu są związane z poziomymi drganiami kratownicy wiatrowej, które wywołują powstawanie periodycznego pionowego obciążenia dynamicznego na dźwigary główne wskutek istnienia mimośrodów pomiędzy środkiem zginania w płaszczyźnie poziomej a środkiem mas jezdni mostu, jak to wykazał S. A. Caplin.

Wobec powyższego wielkość pionowych wychyleń przy drganiach można przyjąć w postaci następującej funkcji:

$$\eta_1 = a \cos \psi_1 t$$

jeżeli drgania mostu będą się odbywały w postaci n półfal, to

$$\eta_n = a \cos \psi_{1n} t \sin \frac{n \pi x}{l}. \quad [35]$$

Podstawiając do równania (34) wartość η i uwzględniając, że

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = - \frac{8f}{l^2},$$

po scałkowaniu otrzymamy:

$$\frac{HL_s}{EA} - \frac{8f}{l^2} \cdot \frac{l}{n\pi} (1 - \cos n\pi) a \cos \psi_{1n} t = 0,$$

$$\text{skąd rozpór dynamiczny } H_{dyn} = \frac{8f (1 - \cos n\pi) EA a \cos \psi_{1n} t}{n \pi l L_s}, \quad [36]$$

gdzie: f — strzałka łańcucha,

E — moduł Younga materiału łańcucha,

A — pole przekroju poprzecznego łańcucha,

L_s — długość sprowadzona,

n — ilość półfal, charakteryzująca postać drgań,

l — rozpiętość mostu (między pilonami),

ψ_{1n} — częstotliwość drgań poziomych mostu wiszącego dwulańcuchowego,

a — amplituda drgań pionowych.

Ze wzoru (35) wynika, że jeżeli drgania mostu odbywają się według postaci o parzystej liczbie półfal ($n = 2, 4, 6$). $H_{dyn} = 0$, tj. drgania nie zależą od amplitudy.

Przy nieparzystej liczbie półfal drgania zależą od amplitudy i czasu. Rozpór dynamiczny osiąga maksimum przy $\cos \psi_{1n} t = 1$.

Przy drganiach mostu wiszącego według postaci o parzystej liczbie półfal współczynnik tłumienia będzie najmniejszy, gdyż w łańcuchu nie powstają naprężenia dodatkowe. Dlatego też można powiedzieć, że drgania charaktery-

zujące się $n = 2.4.6...$ będą najbardziej prawdopodobne, gdyż przy tego rodzaju drganiach łańcuchy nie będą brały udziału w drganiach, tj. nie będą przeciwstawiały się drganiom jezdni mostu.

W moście wiszącym czterolancuchowym wielkość rozporu dynamicznego można określić dla każdego łańcucha osobno z równania:

$$\frac{H_1 L_{s1}}{EA_1} + \int \eta \frac{d^2 y_1}{dx^2} dx = 0, \quad [37]$$

gdzie: H_1 — rozpór jednego z łańcuchów.

Rzędne łańcucha wyznacza się w dźwigarze tego typu z dwóch równań:

w przedziale $0 - \frac{l}{2}$

$$y_1 = \frac{2x}{k} + \frac{4x(l^2 + d^2)}{k_1 l(l + d)} - \frac{8x^2}{k_1(l + d)},$$

$$\text{gdzie } k = \frac{l}{f}; \quad k_1 = \frac{l}{2f_1},$$

a w przedziale $\frac{l}{2} - l$

$$y_1 = \frac{2(l - x)}{k} + \frac{4(l - x)(l^2 + d^2)}{k_2 l(l + d)} - \frac{8(l - x)^2}{k_2(l + d)},$$

gdzie $k_1 = \frac{l}{2f_2}$.

Ponieważ łańcuch w górnej części jest bardzo płaską krzywą, można przyjąć, że $k_2 = \infty$ i wtedy równanie jego w przedziale $\frac{l}{2} - l$ wyrazi się:

$$y_1 = \frac{2(l - x)}{k} \quad (\text{prosta}).$$

Aby podstawić wartości y_1 do całki obejmującej przedział od 0 do l , rozkładamy funkcję y_1 w szereg Fourier, wtedy

$$y_1(x) = \begin{cases} 0 \leq x \leq \frac{l}{2}; & \frac{2a}{k} + \frac{4x(l^2 + d^2)}{k_1(l + d)} - \frac{8x^2}{k_1(l + d)} \\ \frac{l}{2} < x \leq l; & \frac{2(l - x)}{k}; \end{cases}$$

$$y_1 = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{n\pi x}{l}.$$

Współczynniki b_n szeregu wyniosą:

$$b_n = \frac{8l^2}{k_1(l + d)} \left[\frac{4l}{n^3 \pi^3} - \frac{4 \cos \frac{n\pi}{2}}{n^3 \pi^3} - \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{n^2 \pi^2} \right] + \frac{4l(1 - 2 \cos n\pi)}{k_1 \pi}.$$

Po podstawieniu do wzoru i scałkowaniu otrzymamy na rozpór dynamiczny następujący wzór:

$$H_{dyn} = \frac{a \cos \psi_{1n} t E A_1 \left[\frac{4l}{k_1(l+d)} \left(\frac{1}{n\pi} - \frac{4 \cos \frac{n\pi}{2}}{n\pi} - n\pi \sin \frac{n\pi}{2} \right) + \frac{2n\pi(1 - \cos \pi n)}{k} \right]}{L_{s1}}, \quad [38]$$

gdzie: ψ_{1n} — częstotliwość drgań poziomych mostu wiszącego czterolaneuchowego,

d — długość przedziału,

k_1 — wyniosłość dolnych części łańcuchów,

A_1 — pole przekroju poprzecznego łańcucha.

Porównanie rozporów dynamicznych dla mostów dwu i czterolaneuchowych przy następujących danych:

$$a = 0,1 \text{ m}; f = \frac{l}{8} E = 1,7 \cdot 10^6 \text{ kG/cm}^2; A_1 = \frac{A}{2} = 0,03 \text{ cm}^2;$$

$$L_{s1} = L_s = 163; k_1 = 8 \text{ i } \cos \psi_{1n} t = 1 \text{ przytoczone jest w tablicy 54.}$$

Tablica 54

Ilość półfal	Most dwulaneuchowy	Most czterolaneuchowy
$n = 1$	20% H_{stat}	40% H_{stat}
$n = 2$	0	3% H_{stat}
$n = 3$	7% H_{stat}	120% H_{stat}
$n = 4$	0	55% H_{stat}
$n = 5$	4% H_{sta}	176% H_{stat}

Z tablicy tej wynika, że ustrój czterolaneuchowy jest o wiele bardziej stateczny pod względem aerodynamicznym w porównaniu z ustrojem dwulaneuchowym, gdyż ze wzrostem n wzrasta opór sprężysty łańcuchów, które przeciwstawiają się powstawaniu amplitud o skończonej wartości.

Na zakończenie należy przytoczyć jeszcze podstawowy wzór, według którego należy sprawdzać stateczność aerodynamiczną mostu.

Wzór ten wyraża warunek niestateczności, tj. warunek powstania rezonansu lub innymi słowy warunek przejścia drgań poziomych w drgania pionowe. Wyprowadzenie tego wzoru jest podane we wspomnianym podręczniku Caplina. Wzór ma postać następującą:

$$2 \sqrt{\frac{EI_b \frac{n^4 \pi^4}{l^4} + H_{s1} \frac{n^2 \pi^2}{l^2}}{m}} = i \sqrt{\frac{EI_g \frac{n^4 \pi^4}{l^4}}{m_1}}, \quad [39]$$

gdzie: E — współczynnik sprężystości materiału belki usztywniającej,

I_b — moment bezwładności przekroju poprzecznego belki usztywniającej względem osi poziomej, przechodzącej przez środek ciężkości przekroju.

n — ilość półfal charakteryzująca postać drgań,

- l — rozpiętość przęsła wiszącego.
- m — połowa masy całego przęsła wraz z kablem, podzielona przez długość przęsła,
- m_1 — masa przęsła bez kabla, podzielona przez długość przęsła,
- I_g — moment bezwładności przekroju poprzecznego belki wiatrowej (kratownica wiatrowa + płyta jezdni) względem osi pionowej, przechodzącej przez środek ciężkości belki,
- i — 1, 2, 3

Stateczność mostu można uznać za wystarczającą, gdy przy najniekorzystniejszym doborze liczby całkowitej różnica między lewą i prawą stroną wzoru będzie wynosiła co najmniej 30%.

