

§ 1. Siły działające na słup.

Na mechaniczne obciążenie słupa składają się siły następujące:

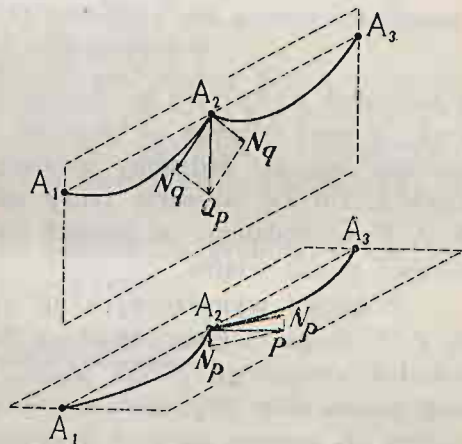
- 1) parcie wiatru na słup (S w kg),
- 2) parcie wiatru na izolatory, trzony i poprzecz-
niki (I w kg),
- 3) waga własna słupa (Q_s w kg),
- 4) waga izolatorów, trzonów i poprzeczników
(Q_i w kg),
- 5) naciąg przewodów (N w kg) z jednej i drugiej strony
słupa.

Naciąg jednostronny ma kierunek styczny do przewodu i może być rozłożony na składową w płaszczyźnie pionowej N_q i w płaszczyźnie poziomej N_p ;

$$\hat{N} = \hat{N}_q + \hat{N}_p.$$

Rys. 1 przedstawia w perspektywie rzut pionowy i poziomy przewodu, zawieszono go w trzech punktach wsporczych: A_1 , A_2 , A_3 .

Na płaszczyźnie pionowej, z obu stron punktu wsporczego A_2 , widać składowki naciągu: N_q , N_q . Kierunek ich jest styczny do pionowego rzutu zwisającego przewodu. Wypadkową tych składowek jest pionowa siła Q_p ;



Rys. 1.

$$\hat{N}_q + \hat{N}_q = \hat{Q}_p.$$

Na płaszczyźnie zaś poziomej, z obu stron punktu wsporczego A_2 , widać składowki naciągu: N_p , N_p . Kierunek ich jest

styczny do poziomego rzutu zwisającego przewodu. Wypadkową tych składników jest pozioma siła P ;

$$\hat{N}_p + \hat{N}_p = \hat{P}.$$

Obie te siły Q_p i P działają na słup za pośrednictwem przewodów, przyczem

Q_p jest wagą przewodów wraz z osadami lodowymi (sadzia), a

P jest parciem wiatru na przewody.

Wypadkowa tych sił (Q_p i P) jest jednocześnie siłą wypadkową z obu naciągów jednostronnych (N , N);

$$\hat{Q}_p + \hat{P} = \hat{N} + \hat{N}.$$

Gdy nie ma wiatru, to

$$N_p = 0, \quad P = 0, \quad N = N_q, \quad \hat{Q}_p = \hat{N} + \hat{N},$$

a wypadkową naciągów z obu stron słupa jest waga przewodów Q_p .

Przy obliczaniu sił P i Q_p liczymy, że na każdy słup przypada połowa rozpiętości przewodów z jednej strony i połowa rozpiętości — z drugiej.

Wszystkie siły ciężkości, wymienione wyżej: Q_s , Q_i , Q_p dają razem sumaryczną siłę ciężkości Q

$$Q_s + Q_i + Q_p = Q$$

o kierunku pionowym. Naciąg ma kierunek zwisającego przewodu, a więc odbiega od poziomu o kąt bardzo mały. Dla uproszczenia sprawy będziemy uważali, że siła N ma kierunek poziomy. Co się wreszcie tyczy sił, wywołanych parciem wiatru: S , I , P , to będziemy je uważali za poziome składniki rzeczywistego parcia wiatru.

Wartości wymienionych sił są dość zmienne. Parcie wiatru S , I , P ulega ciągłym zmianom. Naciąg N zmienia się nie tylko wskutek zmiennego parcia wiatru na przewody (N_p) i zmiennej wagi przewodów (N_q), ale także od zmian temperatury. Waga przewodów Q_p zmienia się pod wpływem sadzi lodowej. Jedynie tylko waga słupa Q_s i waga izolatorów z poprzecznikami Q_i jest wielkością stałą.

Przy wyznaczaniu wymiarów słupa należy się liczyć z największymi wartościami sił, jakie tylko mogą się zdarzyć.

Największe parcie wiatru. Największe parcie wiatru przyjęto liczyć po 125 kg na metr kwadratowy płaszczyzny pro-

stopadłej do kierunku wiatru, a dla konstrukcyj bardzo odpowiedzialnych (na skrzyżowaniach) — po **150 kg**.

Strumień powietrza nie jest tak prostoliniowy, jak np. strumień promieni świetlnych. Powietrze kłębi się i wiruje. Przy obliczaniu parcia wiatru na powierzchnie ażurowe trzeba się z tem liczyć. Powietrze przy niewielkiem zбочeniu uderza nietylko na ścianki przednie, ale i na powierzchnie, znajdujące się w „cieniu wiatrowym”, czyli pozornie osłonięte.

Rys. 2—I przedstawia przekrój słupa żelaznego, zbudowanego z dwóch belek korytkowych. Jak widać z rysunku, przy niewielkiem zбочeniu wiatr trafia zarówno na belkę przednią, jak tylną.

To też przy słupach ażurowych należy do przedniej powierzchni, wystawionej wprost na działanie wiatru, dodać jeszcze **50%** tej wielkości dla uwzględnienia parcia wiatru na ścianki, położone w cieniu wiatrowym.

Strumień powietrza, padając na powierzchnię walcową (rys. 2—II), tylko w małym stopniu trafia ją prostopadle, a w przeważającej części uderza skosem i obślizguje się. Można liczyć, że wiatr o kierunku prostopadłym do osi walca wywiera na powierzchnię walcową takie parcie, jak na płaszczyznę o długości takiej samej i o szerokości, wynoszącej połowę średnicy.

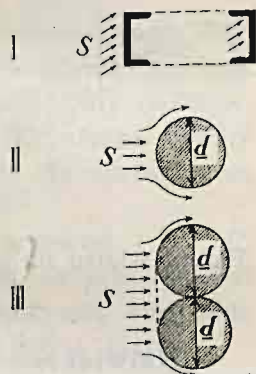
A zatem parcie wiatru na przewód o grubości δ mm przy rozpiętości a metrów oblicza się wg wzoru:

$$[P = \delta \cdot a \cdot 0,001 \cdot 0,5 \cdot 125], \quad (1)$$

a parcie wiatru na słup walcowy o średnicy d cm i o wysokości h^w cm — wg wzoru:

$$[S = d \cdot h^w \cdot 0,0001 \cdot 0,5 \cdot 125]. \quad (2)$$

Gdy dwa walce przystają do siebie na całej długości, jak np. dwa drzewa w słupie bliźniaczym (rys. 21), to strumień powietrza obślizguje się (rys. 2—III) tylko po obu bokach, a na wnękę środkową działa tak, jakby padał na płaszczyznę. Parcie wiatru na obie



Rys. 2.

zewewnętrzne połówki słupów wynosi w sumie tyle, co na jeden walec całkowity:

$$d \cdot h^w \cdot 0,0001 \cdot 0,5 \cdot 125,$$

na obie środkowe połówki tyle, co na płaszczyznę o szerokości d'

$$d \cdot h^w \cdot 0,0001 \cdot 125,$$

a razem:

$$S = d \cdot h^w \cdot 0,0001 \cdot 1,5 \cdot 125. \quad (3)$$



Rys. 3.

Rys. 3 przedstawia plan załomu linii przewodowej ze słupem narożnym. Tym razem kierunek wiatru nie jest prostopadły do osi przewodu, lecz tworzy z nią kąt β .

Parcie wiatru na przewód przy kącie padania β wyniesie:

$$P = \delta \cdot a \cdot 0,001 \cdot 0,5 \cdot \sin \beta \cdot 125. \quad (4)$$

Największa sadź. Wg polskich przepisów na przewody napowietrzne należy liczyć, że największy ciężar osadów lodowych na przewodach o przekroju do 16 mm^2 włącznie może wynosić **0,6** kg na metr, a na przewodach grubszych — **0,8** kg na metr.

Największy naciąg. Największy naciąg przewodu obliczymy, mnożąc przekrój przewodu s (w mm^2) przez największe dopuszczalne naprężenie k (w kg/mm^2); dla drutów miedzianych $k = 12 \text{ kg/mm}^2$, dla linek miedzianych $k = 19 \text{ kg/mm}^2$.

$$\underline{N = s \cdot k}. \quad (5)$$

Naciąg ma kierunek nieco skośny i rozkłada się na trzy składowe: 1) składową poziomą w kierunku linii, 2) składową poziomą w kierunku prostopadłym do linii i 3) składową pionową. Składową poziomą w kierunku prostopadłym do linii jest parcie wiatru na przewody P (patrz rys. 1), a składową pionową — waga przewodów (ewentualnie wraz z sadyżą) Q_p .

Składową poziomą w kierunku linii ma wartość największą, różniącą się bardzo nieznacznie od całkowitego naciągu. To też przy obliczaniu słupów będziemy przypuszczali, że ta składowa

oblicza się wg wzoru (5). Drobną nieściśłość może tylko korzystnie wpłynąć na stopień bezpieczeństwa.

Poziomą składową wzdłuż linii będziemy odtąd dla uproszczenia nazywali wprost — naciągami.

Słupy, ustawione w linii prostej przy jednakowych przewodach i jednakowych rozpiętościach, mają naciągi z obu stron jednakowe. Słupy krańcowe znoszą naciąg jednostronny (N). Wreszcie w słupach narożnych oba naciągi jednostronne dodają się geometrycznie i dają naciąg wypadkowy (N_w).

Średnia wysokość zawieszenia. Przewodniki mogą być zawieszane na słupie wszystkie na jednym poprzeczniku, a więc na jednym poziomie, albo też na kilku poziomach. Siły poziome, działające za pośrednictwem przewodów (P , N), można byłoby rozpatrywać oddzielnie dla każdego poziomu, ale dla uproszczenia rachunku najlepiej skupić je w jednym punkcie.

Wystawmy sobie, że parcie wiatru na przewód 1-szy P_1 działa na wysokości h_1 (cm) nad poziomem ziemi, na przewód 2-gi P_2 działa na wysokości h_2 i t. d. Zamiast rozpatrywać wszystkie te siły z osobna, skupimy je w sumaryczną siłę parcia wiatru:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n,$$

działającą na wysokości

$$h_p = \frac{P_1 h_1 + P_2 h_2 + \dots + P_n h_n}{P_1 + P_2 + \dots + P_n}. \quad (6)$$

Jest to wysokość przyłożenia sumarycznego parcia wiatru na przewody.

To samo tyczy się naciągów. Naciąg przewodu 1-ego N_1 działa na wysokości h_1 , przewodu 2-iego N_2 działa na wysokości h_2 i t. d. Zamiast rozpatrywać wszystkie te siły z osobna, skupiamy je w sumaryczny naciąg:

$$N = N_1 + N_2 + \dots + N_n,$$

działający na wysokości

$$h_n = \frac{N_1 h_1 + N_2 h_2 + \dots + N_n h_n}{N_1 + N_2 + \dots + N_n}. \quad (7)$$

Jest to wysokość przyłożenia sumarycznego naciągu.

Parcie wiatru jest proporcjonalne do średnicy przewodu, a naciąg — do przekroju, a więc do drugiej potęgi średnicy. To też

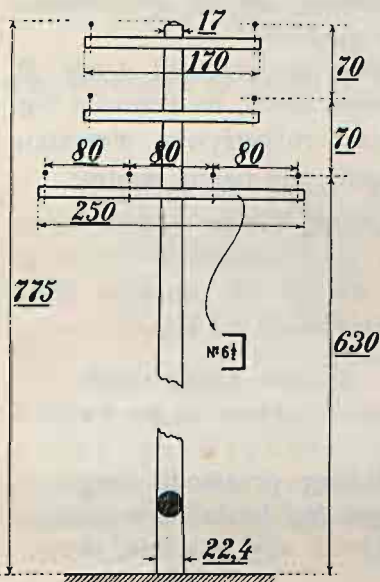
wysokości średnie h_p i h_n mogą wypaść o różnej wartości. Zwykle jednak różnice są nieznaczne i dla jeszcze większego uproszczenia sprawy wybieramy z tych wartości większą i uważamy ją za średnią wysokość zawieszenia przewodów:

$$h_p \leq h^0 \geq h_n. \quad (8)$$

Przykład 1. Słup drewniany (rys. 4) o wysokości 775 cm, o średnicy odgórnej 17 cm i — przyziemnej 22,4 cm dźwiga 2 linki stalowe o przekroju 35 mm² i 6 linek miedzianych o przekroju 50 mm². Układ przewodów i wymiary poprzeczników podaje rysunek. Rozpiętość 40 m. Napięcie robocze 500 V. Obliczyć siły, działające na słup.

Parcie wiatru na słup.

$$S = \left(\frac{17 + 22,4}{2} \right) \cdot 775 \cdot 0,0001 \cdot 0,5 \cdot 125 = 93,5 \text{ kg.}$$



Rys. 4.

Parcie wiatru na izolatory trzony i poprzeczniki. Wybieramy z tabl. VII — izolator typu większego (N. 95), a z tabl. IX — prosty trzon do tego izolatora na 130 kg (№ 3). Obrys izolatora wraz z wystającą częścią trzona daje około 67 cm². Wobec powierzchni obrotowej liczbę tę mnożymy przez współczynnik 0,5. Ośmiu takich izolatorów daje powierzchnię parcia, odpowiadającą płaszczyźnie o obszarze:

$$67 \cdot 0,5 \cdot 8 = 268 \text{ cm}^2.$$

Poprzeczniki wykonane są z żelaza korytkowego o profilu № 6¹/₂, a więc o wysokości 6,5 cm. Trzy poprzeczniki (rys. 4) o sumarycznej długości:

$$170 + 170 + 250 = 590 \text{ cm}$$

dają płaszczynę parcia

$$590 \cdot 6,5 = 3835 \text{ cm}^2.$$

A zatem parcie na izolatory, trzony i poprzeczniki wyniesie:

$$I = (268 + 3835) \cdot 0,0001 \cdot 125 = 52 \text{ kg.}$$

Parcie wiatru na przewody. Średnica linki o przekroju 50 mm² wynosi (tabl. II) 9 mm, a o przekroju 35 mm² .. 7,5 mm;

$$P = (6 \cdot 9 + 2 \cdot 7,5) \cdot 40 \cdot 0,001 \cdot 0,5 \cdot 125 = 173 \text{ kg.}$$

Waga słupa. Ciężkość właściwa drzewa 0,6 (tabl. I);

$$Q_s = \frac{1}{12} \pi (17^2 + 22,4^2 + 17 \cdot 22,4) \cdot 775 \cdot 0,6 \cdot 0,001 = 143 \text{ kg.}$$

Waga izolatorów, trzonów i poprzeczników. Waga izolatora wynosi (tabl. VII) 0,54 kg, waga trzona (tabl. IX) — 0,5 kg, a waga 1 m żelaza korytkowego № 6½ (tabl. V) — 7,05 kg:

$$Q_i = 8 \cdot (0,54 + 0,5) + (170 + 170 + 250) \cdot 0,01 \cdot 7,05 = 50 \text{ kg.}$$

Waga przewodów wraz z sadzią. Ciężkość właściwa miedzi 8,89, a stali 7,7;

$$Q_p = (6 \cdot 50 \cdot 8,89 + 2 \cdot 35 \cdot 7,7) \cdot 40 \cdot 0,001 + 0,8 \cdot 40 \cdot 8 = 130 + 256 = 386 \text{ kg.}$$

Naciąg jednostronny. Dopuszczalne naprężenie dla linek z miedzi twardej wynosi 19 kg/mm², a dla linek stalowych — 28 kg/mm²;

$$N = 6 \cdot 50 \cdot 19 + 2 \cdot 35 \cdot 28 = 7.660 \text{ kg.}$$

Średnia wysokość zawieszenia. Punkt przyłożenia sumarycznego parcia wiatru na przewody leży na wysokości (rys. 4)

$$h_p = \frac{4 \cdot 9 \cdot 630 + 2 \cdot 9 \cdot 700 + 2 \cdot 7,5 \cdot 770}{4 \cdot 9 + 2 \cdot 9 + 2 \cdot 7,5} = 680 \text{ cm,}$$

a punkt przyłożenia sumarycznego naciągu — na wysokości

$$h_n = \frac{4 \cdot 50 \cdot 19 \cdot 630 + 2 \cdot 50 \cdot 19 \cdot 700 + 2 \cdot 35 \cdot 28 \cdot 770}{4 \cdot 50 \cdot 19 + 2 \cdot 50 \cdot 19 + 2 \cdot 35 \cdot 28} = 683 \text{ cm;}$$

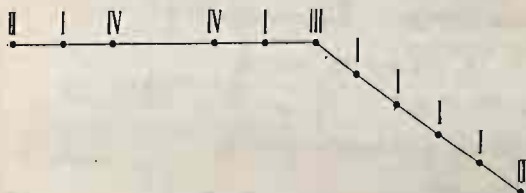
a zatem średnia wysokość zawieszenia przewodów wynosi

$$h^0 = 683 \text{ cm.}$$

§ 2. Rodzaje obciążenia.

Większość słupów stoi na linii prostej między przęsłami o jednakowej rozpiętości. Słupy takie nazywamy przelotowymi. Naciągi (a raczej poziome składowe naciągów) z obu stron są jednakowe i wzajemnie się znoszą. To też słupy przelotowe są znacznie lżejsze, niż wszelkie inne konstrukcje wsporcze.

Rys. 5 przedstawia plan linii napowietrznej, przyczem punkty, oznaczone liczbą I, wyobrażają słupy przelotowe.



Rys. 5.

Zdarzają się wypadki, że słup przelotowy w warunkach nadzwyczajnych otrzymuje obciążenie, któremu nie może sprostać. Łamiąc się, pociąga za pośrednictwem przewodów słupy sąsiednie. Katastrofa się rozszerza.

W jednej z instalacji amerykańskich wykołojony wagon złamał słup, dźwigający znaczną liczbę przewodów gołych i kabli (4500 żył miedzianych), przyczem przewodniki pociągnęły za sobą i przewróciły 60 sąsiednich słupów drewnianych.

Aby zabezpieczyć linię od podobnych katastrof, należy rozstawić wzdłuż linii pewną ilość słupów o większej wytrzymałości. Słupy, które mają lokalizować katastrofę, które nadają linii tężyznę i odgrywają rolę jakby filarów, nazywają się odporowemi. W najgorszym wypadku może się uszkodzić odcinek, zawarty między dwoma pobliskimi słupami odporowemi.

Przy montażu wypręża się przewody odcinkami od jednego słupa odporowego do następnego odporowego, aby nie uszkodzić słupów przelotowych, które nie są obliczone na naciąg.

Słupy krańcowe, na początku i końcu linii (na rys. 5—II), są stale obciążone naciągiem jednostronnym, a słupy narożne (na rys. 5—III) muszą stale znosić naciąg wypadkowy z dwóch naciągów jednostronnych.

Słupy, ustawione na linii prostej między przęsłami różnej rozpiętości (na rys. 5 — IV), nie mogą być poczytywane za przelotowe. Przy zmianach temperatury naciągi zmieniają się odmiennie w przęśle dłuższym i krótszym (p. przykład 14-ty). Na słup działa różnica naciągów. Zależnie od warunków słup może być ciągnięty to w jedną, to w drugą stronę. Momenty, w których naciągi się zrównają (np. podczas największego mrozu, podczas największej sadzi i t. d.) zdarzają się rzadko.

Tak więc, pod względem obciążenia rozróżniamy: 1) słupy, na które naciąg nie działa (przelotowe), 2) słupy, na które naciąg w normalnych warunkach nie działa, lecz może działać bez szkody (odporowe) i wreszcie 3) słupy, które stale są pod naciągiem (krajcowe, narożne) albo podlegają naciągowi bardzo często (między przęsłami różnej rozpiętości).

Nie zawsze można przewidzieć, w jakich warunkach słup będzie najwięcej obciążony. To też, obliczając słup, należy rozpatrzyć i porównać kilka przypadków obciążenia, mniej korzystnych dla słupa.

Różnorodność obciążeń wyraża się tylko w siłach poziomych, działających na słup. Siła pionowa, a więc waga samego słupa, izolatorów, trzonów i poprzeczników, a także waga przewodów wraz z sadzią

$$Q = Q_s + Q_i + Q_p$$

musi być uwzględniona w każdym przypadku.

Rozpatrzmy wszystkie krytyczne przypadki obciążenia dla każdego rodzaju słupów z osobna.

1. Słup przelotowy może być najwięcej narażony w trzech przypadkach.

Przypadek a). Wiatr wieje prostopadle do kierunku linii. Na słup działają dwie siły poziome: 1) parcie wiatru na słup S_{\perp} (wskaźnik \perp oznacza, że wiatr wieje prostopadle do linii) i 2) parcie wiatru na przewody P . W tym przypadku wiatr wieje w kierunku osi poprzeczników, a więc parcie na izolatory, trzony i poprzeczniki jest tak nieznaczne, że możemy je w obliczeniu słupa pominąć.

Na rys. 6—a widzimy plan odcinka linii z jednym słupem przelotowym w tym właśnie przypadku obciążenia.

Przypadek b) (rys. 6—b). Wiatr wieje w kierunku linii. Występują dwie siły poziome: 1) parcie wiatru na słup S_{\parallel} (wskaź-

nik \parallel oznacza, że wiatr wieje równoległe do linii) i 2) parcie wiatru na izolatory i poprzeczniki I . Na przewody wiatr nie działa.

Parcie wiatru na słup S_{\perp} prostopadłe do linii i parcie S_{\parallel} równoległe do linii mogą być różnej wartości. Dla słupów jednak okrągłych i słupów o przekroju kwadratowym parcia te są równowarte

$$S_{\perp} = S_{\parallel}.$$

Przypadek c) (rys. 6—c). W przypadkach a) i b) przypuszczaliśmy, że naciągi z obu stron znoszą się wzajemnie. W wypadkach wyjątkowych może się jednak zdarzyć pewna niesymetria obciążeń obu przęseł. Podczas wirów wiatrowych jedno przęsło może być parte daleko silniej, niż drugie. Podczas znów sadzi warstwy lodowe mogą być z jednej strony słupa obfitsze, niż z drugiej.

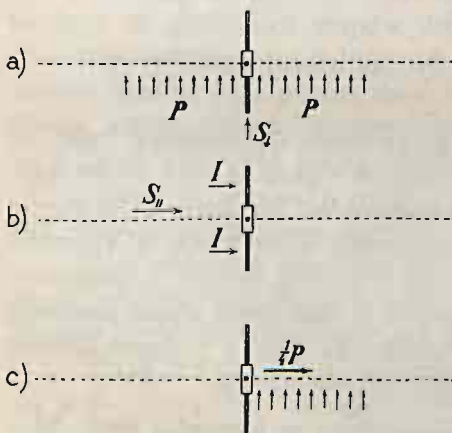
Słup przelotowy niższy od 10 m, obliczony na przypadek a) i b), jest już dość wytrzymały w kierunku linii i niema potrzeby obliczania go na niesymetrię naciągów.

Natomiast słupy wyższe od 10 m są bardziej wystawione na wiry wiatrowe i dlatego należy je liczyć na niesymetrię. Na mocy doświadczenia przyjęto liczyć, że różnica naciągów od niesymetrii może dojść do jednej czwartej wartości parcia wiatru na przewody

$$\left| \frac{1}{4} P \right|.$$

Ponieważ w przypadku c) liczymy na $\frac{1}{4} P$, a w przypadku a)—na całe P , przeto dla słupów o przekroju kołowym lub kwadratowym obciążenie c) będzie zawsze korzystniejsze od obciążenia a). Stąd wyprowadzamy wniosek, że na wiry wiatrowe

wypada liczyć tylko słupy, które w kierunku linii są bardziej wiotkie, niż w kierunku prostopadłym do linii.



Rys. 6.

2. Słup odporowy w warunkach normalnych pracuje tak, jak przelotowy. Pozatem musi wytrzymać pewien naciąg jednostronny w czasie zawieszania przewodów albo też w razie wypadku pęknięcia naraz kilku przewodów z jednej strony.

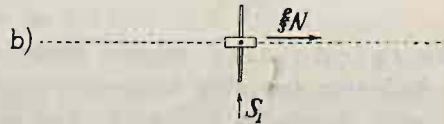
Przypadek a) taki sam, jak przypadek a) dla słupa przelotowego (rys. 6—a).

Przypadek b); 1) naciąg jednostronny i 2) parcie wiatru na słup prostopadłe do linii S_{\perp} (rys. 7).

Byłoby przesadą, gdybyśmy słupy odporowe obliczali na największy naciąg jednostronny. Podczas montażu nie zawiesza się wszystkich przewodników naraz, a gdyby nawet wypadło obciążyć słup z jednej strony wszystkimi przewodnikami, to naciąg wyniósłby nie więcej nad $\frac{2}{3}$ pełnego naciągu. Pełny bowiem naciąg panuje tylko przy największym mrozie (-30° C) albo przy największej sady, a w tych warunkach nie montuje się linii. Trudno także przypuścić, aby naraz pękły wszystkie przewody i to tylko z jednej strony.

Na mocy doświadczenia przyjęto liczyć słupy odporowe na dwie trzecie największego naciągu jednostronnego

$$\left[\frac{2}{3} N \right].$$



Rys. 7.

Jeżeli jednak chodzi o trzony izolatorowe i poprzeczniki do słupów odporowych, to tu zachodzi daleko większa możliwość obciążenia naciągiem całkowitym. To też poprzeczniki i trzony należy obowiązkowo liczyć na pełny naciąg jednostronny.

Słupów odporowych nie liczymy na obciążenie przelotowe b) i c), gdyż siły wzdłuż linii (S_{\parallel} , l , $\frac{1}{4}P$) są znacznie mniejsze od naciągu ($\frac{2}{3}N$). Trzeba przytem zwrócić uwagę, że słupy odporowe, w przeciwieństwie do przelotowych, muszą być bardziej wytrzymałe wzdłuż linii, niż wpoprzek. Wskutek tego ścianki poprzeczne nie mogą być szersze od podłużnych (porównaj rys. 7 z rys. 6), a parcie wiatru wzdłuż linii nie może być większe od parcia prostopadłego;

$$S_{\parallel} \leq S_{\perp}.$$

Nie liczymy też słupów odporowych na naciąg ($\frac{2}{3}N$) i jednoczesny wiatr wzdłuż linii (S_{\parallel}). Naciąg $\frac{2}{3}N$ jest obciążeniem teoretycznym, które gwarantuje dostateczną wytrzymałość słupa wzdłuż linii. Siła parcia S_{\parallel} w porównaniu z naciągiem $\frac{2}{3}N$ jest zwykle znacznie mniejsza.

3. Słup krańcowy.

Przypadek a). Wiatr wieje w kierunku linii (rys. 8—*a*). Działa całkowity naciąg jednostronny N , parcie wiatru na słup S_{\parallel} i parcie na izolatory I .



Rys. 8.

Przypadek b). Wiatr wieje w kierunku prostopadłym do linii (rys. 8—*b*). Przewody odchylają się od kierunku linii prostej. Wobec tego naciąg ma kierunek niezupełnie zgodny z kierunkiem linii. Nie uwzględniamy jednak tego odchyłu przy obliczaniu słupów. Przypuszczamy, że wzdłuż linii działa całkowity naciąg N , a więc przeceniamy składową, działającą w tym kierunku, natomiast nie

uwzględniamy parcia wiatru na przewody. Oba te drobne uchybienia (na słup krańcowy przypada tylko połowa rozpiętości, a więc parcie na przewody jest niewielkie!) działają przeciw sobie.

Tak więc słup liczymy na całkowity naciąg jednostronny N i parcie wiatru na słup S_{\perp} .

W słupach krańcowych tak samo, jak w odporowych, ścianki poprzeczne nie mogą być szersze od podłużnych i parcie wzdłuż linii może być tylko mniejsze lub równe parciu prostopadłemu;

$$S_{\parallel} \leq S_{\perp}.$$

To też przypadek *a*) jest prawie zawsze korzystniejszy dla słupa, niż *b*). Jeżeli uwzględniliśmy go, to tylko dlatego, że przy rozległych poprzecznikach i licznych izolatorach parcie I może przeważać szalę i uczynić przypadek *a*) mniej korzystnym.

4. Słup narożny.

Przypadek a). Wiatr wieje w kierunku wypadkowego naciągu (rys. 9—*a*). Parcie wiatru na przewody mieści się całkowicie w naciągu. Chcąc obliczyć ściśle naciąg wypadkowy, należałoby uwzględnić, że pod wpływem wiatru przewody nabierają kształtu linii krzywych, wklęsłych (rys. 1—rzut poziomy), a wskutek tego kąt załomu przewodów może być mniejszy od kąta załomu linii.

Gdy kąt załomu (na rys. 9—*a* kąt 2β) nie jest zbyt rozwarty, naciąg wypadkowy jest tak wielki w porównaniu z parciem wiatru na przewody, że można nie uwzględniać wpływu wia-

tru. Uchybienie będzie nieznaczne. Zresztą niedocenicenie parcia wiatru kryje się poniekąd przecenianiem poziomego składnika naciągu (§ 1 — największy naciąg).

Gdy jednak kąt załomu będzie tak rozwarty, że otrzymamy większą wartość dla parcia wiatru na przewody P , niż dla naciągu wypadkowego N_w , wówczas nieliczenie się z parciem wiatru byłoby błędem.

A zatem, obliczywszy naciąg wypadkowy N_w bez uwzględnienia parcia wiatru wg wzoru

$$\underline{N_w = 2 N \cdot \cos \beta}, \quad (9)$$

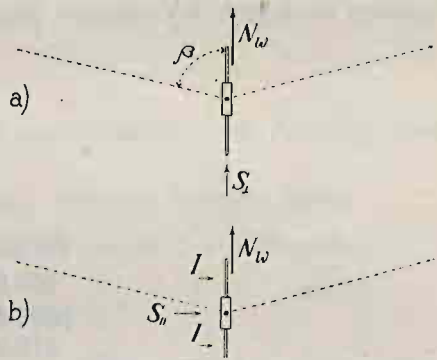
należy jeszcze obliczyć parcie wiatru na przewody P wg wzoru (4)

$$P = \delta \cdot a \cdot 0,001 \cdot 0,5 \cdot \sin \beta \cdot 125$$

i z dwóch tych wartości wziąć do dalszego rachunku większą (porów. przykład 7-my).

W przypadku a) oprócz naciągu uwzględnia się jeszcze parcie wiatru na słup S_{\perp} .

Przypadek b). Wiatr wieje prostopadle do wypadkowego naciągu (rys. 9—b). Działa naciąg wypadkowy N_w , obliczony bez względu na kąt rozwarcia wg wzoru (9), tudzież parcie wiatru na słup S_{\parallel} i na poprzeczники z izolatorami I .



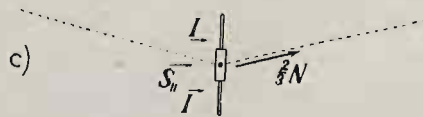
Rys. 9.

5. Słup narożno - odporowy w warunkach normalnych pracuje tak, jak narożny.

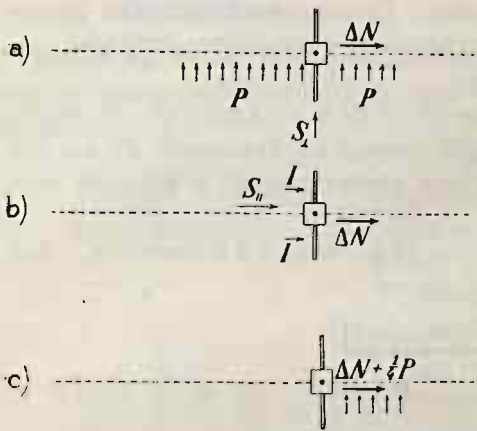
Przypadek a) taki sam, jak przypadek a) dla słupa narożnego (rys. 9—a).

Przypadek b) taki sam, jak przypadek b) dla słupa narożnego (rys. 9—b).

Przypadek c) w razie pęknięcia przewodów. Wiatr w kierunku prostopadłym do wypadkowego naciągu (rys. 10). Dzia-



Rys. 10.



Rys. 11.

obciążenia (rys. 11), dodając tylko jedną nową siłę — największą różnicę naciągów ΔN (porów. przykład 14-ty).

łają siły: parcie wiatru na słup S_{\parallel} , na poprzeczniki z izolatorami I , tudzież dwie trzecie największego naciągu $\frac{2}{3}N$ w jednym z kierunków linii.

6. Słup między przęsłami różnej rozpiętości.

W słupach tego rodzaju występuje różnica naciągów. W pewnych warunkach atmosferycznych różnica ta osiąga wartość największą ΔN . Słupy oblicza się tak, jak przelotowe, na trzy przypadki

§ 3. Słupy drewniane wogóle.

Wymiary drzewa. Słupy drewniane mają wymiary ograniczone przez naturę. W Ameryce długość słupów normalnych dochodzi do 20 m, u nas — do 16 m. Średnice u wierzchołka w słupach normalnych nie przekraczają 24 cm.

Jak wiadomo, drzewa mają kształt ściętych stożków. Przyrost średnicy, licząc od wierzchołka w dół, bywa rozmaity, zależnie od gatunku drzewa i od grubości u wierzchołka. Przyrost ten wynosi średnio dla drzewa:

świerkowego	0,005	cm na 1 cm długości,
sosnowego	0,007	" " " "
kasztanowego	0,011	" " " "
cedrowego	0,015	" " " "

Im drzewo jest grubsze u wierzchołka, tem większy jest przyrost.

Tak np. drzewo sosnowe przy średnicy u wierzchołka

13 cm	wykazuje przyrost	0,0035	cm na 1 cm długości,
15 cm	" "	0,006	" " " "
18 cm	" "	0,0085	" " " "
21 cm	" "	0,010	" " " "

Dla gatunków drzewa, używanych w Polsce (sosna, jodła), możemy przyjąć, że przyrost grubości słupa wynosi średnio:

$$\boxed{\Delta = 0,007 \text{ cm na 1 cm długości}}$$

Dopuszczalne naprężenia i dopuszczalne średnice. Naprężenie dopuszczalne zależy od kilku czynników: 1) od gatunku drzewa (drzewa twarde — dąb, buk — są bardziej wytrzymałe od iglastych), 2) od tego, czy drzewo jest wystawione na gnicie, czy nie (podziemna część słupa i strefa 50 cm nad ziemią jest narażona najbardziej) i 3) od tego, czy drzewo jest nienasycone, nasycone sposobem mniej pewnym (krezonaftą, chlorkiem cynku), czy wreszcie nasycone sposobem najlepszym (olejem smołowym)

W tym ostatnim przypadku dopuszczamy naprężenia największe, gdyż, zabezpieczywszy drzewo od gnicia, możemy zadowolić się daleko mniejszym stopniem bezpieczeństwa.

Wartości dopuszczalnych naprężeń podaje tabl. I.

Drzewo zbyt młode jest mniej trwałe. Stąd pochodzi przepis niestosowania drzewa o małej średnicy odgórnej. Najmniejsza dopuszczalna średnica odgórna wynosi:

12 cm — dla słupów pojedynczych lub podpartych dla przewodów niskiego napięcia,

15 cm — j. w. dla przewodów wysokiego napięcia,

10 cm — dla podwójnych słupów sklinowanych (bliźniaczych, rozkracznym, A-owych i t. d.) i słupów wielokrotnych,

9 cm — dla podpór i słupów bliźniaczych niesklinowanych.

Poziom zamocowania w ziemi. Przy obliczaniu słupa na zginanie uważamy, że przekrój niebezpieczny leży bądź przy powierzchni ziemi, bądź wyżej. Przypuszczamy, że samo zakopanie w ziemi zabezpiecza podziemną część słupa od złamania.

Inaczej jest przy obliczaniu słupa na wyboczenie. Górne warstwy ziemi są za mało odporne, aby mogły zapobiec niewielkiemu odkształceniu, które zachodzi w dolnej części wybaczonej belki. Chcąc stosować 3-ci wzór Eulera, musimy mieć zamocowanie doskonałe. Przyjęto uważać poziom na połowie głębokości zakopania za poziom dobrego zamocowania.

Wyboczenie. Żerdzie o obu końcach prowadzonych (np. górna część żerdzi w słupach A-owych rys. 25) oblicza się wg 2-go wzoru Eulera

$$F \cdot \sigma = \pi^2 \frac{E J^S}{l^2}, \quad (10)$$

żerdzie o jednym końcu prowadzonym, a drugim zamocowanym w ziemi (np. w słupie rozkracznym—rys. 22, odciążonym—rys. 26, podpartym—rys. 27) — według 3-go wzoru Eulera

$$F \cdot \sigma = 2 \pi^2 \frac{E J^S}{l^2}, \quad (11)$$

przyczem F oznacza wysiłek ściskania w kg,

σ — stopień bezpieczeństwa,

E — sprężystość drzewa w kg/cm² ($E = 106\,000$),

J^S — moment bezwładności przekroju żerdzi na środku

długości wybożenia (w punkcie S) w cm^4 , wreszcie l — długość wybożenia żerdzi w cm .

Długość wybożenia żerdzi, zamocowanych w ziemi, jak już zaznaczyliśmy wyżej, składa się z długości nadziemnej plus połowa odcinka podziemnego (rys. 22, 25, 56, 27).

Stopień bezpieczeństwa σ zależy tak samo, jak naprężenie dopuszczalne: 1) od gatunku drzewa, 2) od większego lub mniejszego narażenia na gnicie i 3) od sposobu nasycenia. Im większe jest naprężenie dopuszczalne, tem mniejszy stopień bezpieczeństwa.

Naprężenie dopuszczalne (k)	Stopień bezpieczeństwa (σ)
od 80 do 100 kg/cm^2	5
145 „	4
od 190 do 330 „	3.

Dla przekroju kołowego moment bezwładności wynosi

$$J^S = \frac{\pi (d^S)^4}{64}, \quad (a)$$

przyczem d^S oznacza średnicę żerdzi na środku długości wybożenia (w punkcie S) w cm . Po podstawieniu wartości J^S do wzoru (11) otrzymujemy

$$\boxed{F \cdot \sigma = \frac{E \cdot (d^S)^4}{l^2}}. \quad (12)$$

Słupy przelotowe. Pojedyncze słupy przelotowe można obliczać wg następującego wzoru empirycznego:

$$\boxed{d^W = 0,0065 h^W + \chi \sqrt{a \cdot \Sigma \delta}}, \quad (13)$$

przyczem d^W oznacza średnicę słupa u wierzchołka w cm ,
 h^W — wysokość słupa od poziomu ziemi do wierzchołka w cm ,

a — rozpiętość w m ,

$\Sigma \delta$ — sumę średnic w mm wszystkich zawieszonych na słupie przewodów, wreszcie

χ — współczynnik liczbowy, który zależy od dopuszczalnego naprężenia dla danego gatunku drzewa.

Dopuszczalne naprężenie	Współczynnik liczbowy
80 kg/cm^2	$\chi = 0,32$
145 „	0,22
190 „	0,19
280 „	0,14.



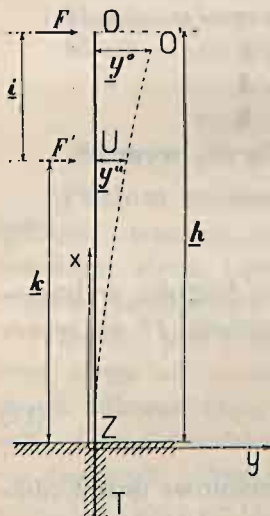
Przykład 2. Słup przelotowy (rys. 4) z drzewa nasyconego (chlorkiem cynku), o wysokości 775 cm, dźwiga 2 linki stalowe o przekroju 35 mm² i 6 miedzianych o przekroju 50 mm². Rozpiętość 40 m. Obliczyć średnicę słupa odgorną i przyziemną.

Średnica odgorna:

$$d^W = 0,0065 \cdot 775 + 0,22 \sqrt{40 \cdot (2 \cdot 7,5 + 6 \cdot 9)} = 16,6 = 17 \text{ cm,}$$

średnica przyziemna:

$$d^Z = d^W + \Delta \cdot h = 17 + 0,007 \cdot 775 = 22,4 \text{ cm.}$$



Rys. 12.

Przekładanie siły. Przy obliczaniu słupów zachodzi nieraz potrzeba zastąpienia siły poziomej, działającej na słup, inną siłą umyślną, również poziomą, przyłożoną na innej wysokości i wywierającą na słup ten sam skutek. Nazywamy tę czynność przekładaniem siły na inną wysokość.

Rys. 12 przedstawia słup OT , osadzony w ziemi na głębokości ZT . W punkcie O słup jest obciążony siłą poziomą F , a w punkcie U — siłą poziomą F' . Dla słupa o jednostajnym momencie bezwładności J równanie linii odkształconej na górnym odcinku $O'U$ względem rzędnych x , y jest następujące

$$y = \frac{1}{2EJ} \left[F \left(hx^2 - \frac{x^3}{3} \right) + F' \left(k^2x - \frac{k^3}{3} \right) \right], \quad (14)$$

przyczem h jest ramieniem siły F , a k — ramieniem siły F' .

Przekładanie siły z góry na dół. Przypuśćmy, że na słup działa tylko siła F w punkcie O i że chcemy ją zastąpić siłą umyślną F' w punkcie U z tym warunkiem, aby ugięcie słupa w punkcie U pozostało o tej samej wartości y^U . W pierwszym przypadku

$$F' = 0, \quad x = k, \quad y = y^U, \quad y^U = \frac{1}{2EJ} \left[F \left(hk^2 - \frac{k^3}{3} \right) \right],$$

a w drugim

$$F = 0, \quad x = k, \quad y = y^U, \quad y^U = \frac{1}{2EJ} \left[F' \left(k^3 - \frac{k^3}{3} \right) \right].$$

Z równości ugięcia wynika, że

$$F \left(hk^2 - \frac{k^3}{3} \right) = F' \left(k^3 - \frac{k^3}{3} \right), \quad h = i + k,$$

$$\boxed{F' = F \left(1 + \frac{3i}{2k} \right)}. \quad (15)$$

Taka jest wartość umyślonej siły F' .

Gdybyśmy wartość przłożonej siły F' obliczali przez zrównanie momentów sił F i F' względem punktu Z

$$F \cdot (i + k) = F' \cdot k$$

(obliczenie błędne, gdyż punkt Z jest punktem zamocowania, a nie obrotu), to otrzymalibyśmy wartość

$$F = F' \left(1 + \frac{2i}{2k} \right) \quad (b)$$

mniejszą, niż rzeczywista (wzór „15^a”).

Przekładanie siły z dołu na górę. Przypuśćmy, że na słup działa tylko siła F' w punkcie U i że chcemy ją zastąpić siłą umyśloną F w punkcie O z tym warunkiem, aby ugięcie słupa w punkcie O pozostało o tej samej wartości y^0 . W pierwszym przypadku

$$F = 0, \quad x = h, \quad y = y^0, \quad y^0 = \frac{1}{2EJ} \left[F' \left(k^2 h - \frac{k^3}{3} \right) \right],$$

a w drugim

$$F' = 0, \quad x = h, \quad y = y^0, \quad y^0 = \frac{1}{2EJ} \left[F \left(h^3 - \frac{h^3}{3} \right) \right].$$

Z równości ugięcia wynika, że

$$F' \left(k^2 h - \frac{k^3}{3} \right) = F \left(h^3 - \frac{h^3}{3} \right),$$

$$\boxed{F = F' \frac{k^3}{h^3} \left(1 + \frac{3i}{2k} \right)}. \quad (16)$$

Taka jest wartość umyślonej siły F .

Gdybyśmy wartość przłożonej siły F obliczali przez zrównanie momentów sił F' i F względem punktu Z , to otrzymalibyśmy wartość

$$F = F' \frac{h}{i + k}$$

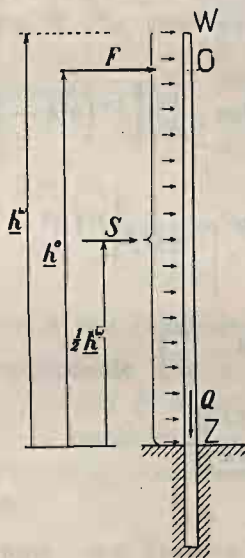
większą, niż rzeczywista (wzór „16^a”). Popelniony błąd tym razem wpływa na przeszacowanie siły i nie przedstawia żadnego niebezpieczeństwa.

§ 4. Pojedynczy słup jednolity.

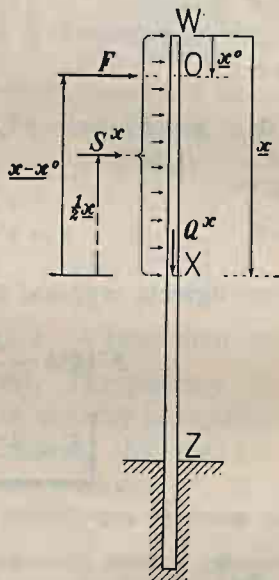
Na słup WZ (rys. 13) o wysokości h^W działają trzy siły:

- 1) F — siła pozioma (np. naciąg, parcie wiatru na przewody, parcie na izolatory i poprzeczniki), skupiona w punkcie O na wysokości h^O ,
- 2) S — parcie wiatru na słup, rozłożone równomiernie na całej wysokości słupa i
- 3) Q — waga przewodników (z sadzią), izolatorów, poprzeczników i słupa.

Słup pod wpływem dwóch pierwszych sił pracuje na zginanie, a pod wpływem wagi — na ściskanie.



Rys. 13.



Rys. 14.

Słup powinien otrzymać takie wymiary, aby największe naprężenie w dowolnym przekroju X (rys. 14) na odległości x od

wierzchołka nie przekraczało dopuszczalnego naprężenia k . W przekroju tym działa:

- 1) moment od siły F o ramieniu $(x - x^0)$ i
- 2) moment od parcia wiatru na odcinku słupa WX ; parcie to wyobrażamy sobie w postaci siły S^x , skupionej na środku tego odcinka, o ramieniu $\frac{x}{2}$,
- 3) siła ciężkości Q^x , czyli waga przewodów, izolatorów i t. d. tudzież waga słupa na odcinku WX .

Moment zginania M^x od pierwszych dwóch sił wynosi

$$M^x = F \cdot (x - x^0) + S^x \cdot \frac{x}{2},$$

naprężenie zginania

$$\frac{M^x}{W^x},$$

a naprężenie ściskania od siły ciężkości

$$\frac{Q^x}{s^x},$$

przyczem W^x oznacza moment wytrzymałości przekroju X w cm^3 , a s^x — pole przekroju w cm^2 .

Całkowite naprężenie w krańcowych włóknach przekroju X będzie się równało sumie naprężeń zginania i ściskania:

$$\left[\rho^x = \frac{M^x}{W^x} + \frac{Q^x}{s^x} \right]. \quad (17)$$

Mając wyznaczone wymiary słupa, obliczamy naprężenia dla kilku przekrojów i sprawdzamy, czy znalezione wartości naprężeń nie przekraczają dopuszczalnego naprężenia k .

Powstaje pytanie, w jaki sposób wyznaczyć wymiary słupa. Jeżeli projektujemy drewniany słup przelotowy, to wzór (13) rozwiązuje sprawę. Gdy jednak mamy do czynienia ze słupem nieprzelotowym, albo niedrewnianym, to musimy początkowo zlekceważyć siły nieznane (parcie wiatru na słup, wagę słupa), wyznaczyć wymiary słupa na podstawie nierówności

$$M^x > F(x - x^0); \quad \rho^x > \frac{F(x - x^0)}{W^x}; \quad \rho^x \leq k; \quad W^x > \frac{F(x - x^0)}{k} \quad (a)$$

i sprawdzić naprężenia wzorem (17). Gdyby wynik był niezadowalniający, należałoby zmienić wymiary i jeszcze raz obliczyć naprężenia.

Przykład 3. Obliczyć stalowy słup rurowy, przelotowy, dla linii, złożonej z dwóch linek stalowych o przekroju 35 mm^2 i sześciu linek miedzianych o przekroju 50 mm^2 . Układ przewodów i wymiary poprzeczników takie same, jak na słupie drewnianym, w przykładzie 1-ym i na rys. 4. Rozpiętość 40 m.

Wyznaczenie wymiarów. Słupy przelotowe oblicza się na trzy przypadki obciążenia. W naszym przykładzie przypadek b) będzie prawdopodobnie korzystniejszy dla słupa od przypadku a), a przypadek c) w grę nie wchodzi (słup niższy od 10 m!).

Przypadek a). Wiatr prostopadły do linii (rys. 6-a). W przykładzie 1-ym obliczono już parcie wiatru na przewody P i średnią wysokość zawieszenia

$$P = 173 \text{ kg} \qquad h^0 = 683 \text{ cm.}$$

Dla przekroju przyziemnego Z obliczamy pożądaną moment wytrzymałości wg wzoru (17)

$$-x^0 = h^0 = 683 \text{ cm; } k \text{ dla stali (tabl. I)} = 2000 \text{ kg/cm}^2;$$

$$WZ > \frac{173 \cdot 683}{2000} = 59 \text{ cm}^3.$$

Moment wytrzymałości przekroju rury o średniej średnicy d i o grubości ścianek c wyraża się wzorem przybliżonym

$$W = 0,8 d^2 c.$$

Wybieramy rury stalowe o grubości ścianek 0,5 cm. Pożądana średnica d dla przekroju Z będzie się wyrażała wzorem

$$dZ = \sqrt{\frac{WZ}{0,8 \cdot c}} > \sqrt{\frac{59}{0,8 \cdot 0,5}} = 12,2 \text{ cm.}$$

Dla pewności wyznaczamy rurę o średnicy zewnętrznej 15 cm i o średnicy wewnętrznej 14 cm.

Dla zaoszczędzenia materiału i dla estetyki projektujemy słup, zwężający się ku wierzchołkowi, a mianowicie spojony z trzech rur rozmaitej średnicy. Przyjmując tę samą zbieżność, co w słupach drewnianych, obliczamy pożądaną średnicę u wierzchołka

$$d^W = 15 - 0,007 \cdot 775 = 9,6 \approx 10 \text{ cm.}$$

Projektujemy górną część słupa WA

o długości 200 cm z rury 10/9 cm,

środkową część słupa AB

o długości 250 cm z rury 12,5/11,5 cm

i wreszcie dolną część słupa BZ

o długości 325 cm z rury 15/14 cm.

Sprawdzenie naprężeń. Parcie wiatru na słup wyniesie

$$(15 \cdot 325 + 12,5 \cdot 250 + 10 \cdot 200) \cdot 0,0001 \cdot 0,5 \cdot 125 = 31 + 20 + 13 = 64 \text{ kg,}$$

waga nadziemnej części słupa

$$\left[\left(\frac{15 + 14}{2} \right) \cdot 325 + \left(\frac{12,5 + 11,5}{2} \right) \cdot 250 + \left(\frac{10 + 9}{2} \right) \cdot 200 \right] \cdot \pi \cdot \frac{1}{2} \cdot 7,9 \cdot 0,001 =$$

$$= 58 + 37 + 24 = 119 \text{ kg,}$$

parcie na poprzeczki i izolatory (z przykł. 1-go)

$$52 \text{ kg,}$$

a waga przewodników (z sadzią), poprzeczek, trzonów i izolatorów (z przykł. 1-go)

$$130 + 256 + 50 = 436 \text{ kg.}$$

przew. sadz izol., poprz.

Przypadek a). Wiatr prostopadły do linii (rys. 6-a).

Przekrój Z.

$$P = 173 \text{ kg; } S = 64 \text{ kg; } Q = 436 + 119 = 555 \text{ kg.}$$

Moment zginania wynosi

$$MZ = 173 \cdot 683 + 64 \cdot \frac{775}{2} = 142\,959 \text{ kgcm;}$$

moment wytrzymałości przekroju

$$WZ = \frac{\pi}{32} \frac{15^4 - 14^4}{15} = 80 \text{ cm}^3;$$

pole przekroju

$$sZ = \frac{\pi}{4} (15^2 - 14^2) = 22,7 \text{ cm}^2;$$

wreszcie naprężenie sumaryczne

$$\rho Z = \frac{142\,959}{80} + \frac{555}{22,7} = 1790 + 25 =$$

$$= 1815 \text{ kg/cm}^2 < 2000 \text{ kg/cm}^2 \text{ (tabl. I).}$$

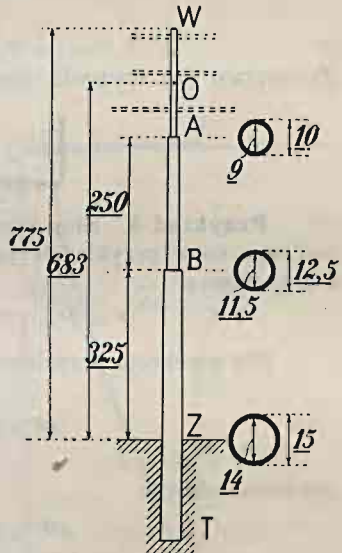
Przekrój B.

$$P = 173 \text{ kg; } S = 20 + 13 = 33 \text{ kg;}$$

$$Q = 436 + 37 + 24 = 497 \text{ kg;}$$

$$MB = 173 \cdot 358 + 33 \cdot \frac{450}{2} = 69\,359 \text{ kgcm; } WB = 55 \text{ cm}^3; s^B = 19 \text{ cm}^2,$$

$$\rho^B = \frac{69\,359}{55} + \frac{497}{19} = 1260 + 26 = 1286 \text{ kg/cm}^2 < 2000 \text{ kg/cm}^2.$$



Rys. 15.

Przekrój A.

$$P = 173 \text{ kg}; \quad S = 13 \text{ kg}; \quad Q = 436 + 24 = 460 \text{ kg};$$

$$MA = 173 \cdot 108 + 13 \cdot \frac{200}{2} = 20\,524 \text{ kg cm}; \quad WA = 34 \text{ cm}^3; \quad sA = 15 \text{ cm}^2;$$

$$pA = \frac{20\,524}{34} + \frac{460}{15} = 603 + 31 = 634 \text{ kg/cm}^2 < 2000 \text{ kg/cm}^2.$$

Przypadek b). Wiatr równoległy do linii (rys 6 — b).

Parcie wiatru na słup ($S = 64 \text{ kg}$) pozostanie bez zmiany, a zamiast parcia wiatru na przewody ($P = 173 \text{ kg}$) przybędzie parcie wiatru na poprzeczniki i izolatory ($I = 52 \text{ kg}$).

A więc przypadek b) jest dla słupa korzystniejszy.

Przypadek c) (rys. 6—c) nie wchodzi w grę, gdyż słup jest niższy od 10 m.

A zatem największe naprężenie występuje przy wietrze, prostopadłym do linii, w przekroju przyziemnym.

Dla słupów okrągłych niewydrążonych, a więc dla wszelkich pojedynczych słupów drewnianych moment wytrzymałości wynosi

$$W^X = \frac{\pi (d^X)^3}{32}. \quad (\text{b})$$

Ze wzoru (a) wypada wzór dla wyznaczenia średnicy d^X

$$\boxed{d^X > 2,15 \sqrt[3]{\frac{F \cdot (x - x^0)}{k}}}. \quad (18)$$

Przykład 4. Słup przelotowy z drzewa, nasyconego chlorkiem cynku, ten sam, co w przykładzie 1-ym (rys. 4) i 2-im. Obliczyć średnicę odgórną i przyziemną.

$$F = P = 173 \text{ kg}; \quad k = 145 \text{ kg/cm}^2 \text{ (tabl. 1)}.$$

Dla przekroju przyziemnego $x - x^0 = h^0 = 683 \text{ cm}$; średnica przyziemna

$$dZ > 2,15 \sqrt[3]{\frac{173 \cdot 683}{145}} = 20 \text{ cm};$$

średnica odgórną

$$dW > 20 - 0,007 \cdot 775 = 14,6 \text{ cm}.$$

Wzór empiryczny (13) dał dla tej średnicy 16,6 cm (przykł. 2).

W słupach drewnianych największe naprężenia występują albo w przekroju przyziemnym, albo nieco wyżej. Już z doświadczenia wiadomo, że słupy drewniane

tak, jak drzewa rosnące, pod wpływem nadmiernych sił poziomych (np. siły wiatru) łamią się częstokroć powyżej przekroju przyziemnego. Następujące przesłanki teoretyczne wykażą również, że przekrój niebezpieczny może wypaść powyżej przekroju przyziemnego.

Słup na rys. 16 jest obciążony siłą poziomą F , skupioną w punkcie O w odstępnie x^0 od wierzchołka. Średnica słupa d^x w dowolnym przekroju X wynosi

$$d^x = d^w + \Delta \cdot x,$$

przyczem d^w jest średnicą u wierzchołka w cm,

Δ — przyrostem średnicy w cm na 1 cm długości słupa ($\Delta = 0,007$),

x — odległością dowolnego przekroju X od wierzchołka W .

Moment wytrzymałości przekroju X wynosi

$$W^x = \frac{\pi}{32} (d^x)^3,$$

a największy dozwolony moment zginania M_{dzw}^x przy największym dopuszczalnym naprężeniu k (w kg/cm^2) —

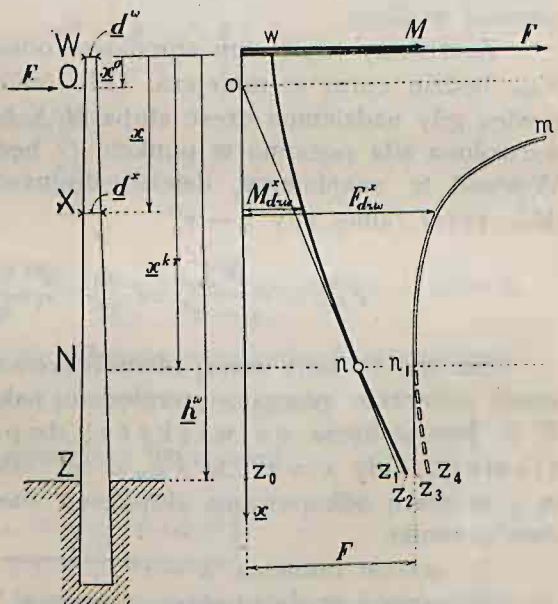
$$M_{dzw}^x = W^x \cdot k = \frac{\pi}{32} (d^w + \Delta \cdot x)^3 \cdot k. \quad (c)$$

Na rys. 16 linja *wnz*₂ (tłusta) ilustruje powyższe równanie względem nakreślonych spórzędnych: M , x . nnemi słowy jest to kresa dopuszczalnego momentu zginania. Moment ten, poczynając od wierzchołka, stale wzrasta.

Rzeczywisty moment zginania, wywołany siłą F w dowolnym przekroju X , wyniesie

$$F \cdot (x - x^0).$$

Na wykresie rzeczywisty moment



Rys. 16

zginania będzie linią prostą, przechodzącą przez punkt o , odległy od wierzchołka o odcinek x^0 . Siła F musi być tak dobrana, aby rzeczywisty moment zginania w żadnym przekroju nie przekroczył dopuszczalnego momentu zginania. Linia prosta on_1z_1 , wychodząca z punktu o i stykająca się z krzywą wnz_2 w punkcie n , będzie kresą rzeczywistego momentu zginania największej siły F_{dzw} , dopuszczalnej dla naszego słupa. Prosta, wychodząca również z punktu o , lecz bardziej odchylna od pionu, przecinałaby krzywą i wkraczała w sferę momentów dla słupa niedopuszczalnych.

W ten sposób znaleźliśmy wykreślnie przekrój niebezpieczny N ; leży on na poziomie punktu styczności n . Rzeczywisty moment zginania (kresa prosta) powyżej tego punktu i poniżej jest mniejszy od dopuszczalnego (kresa krzywa), a tylko w punkcie n oba te momenty są sobie równe.

Dla gruntowniejszego wyświetlenia tej sprawy ujmijmy ją jeszcze w inny sposób.

Wystawmy sobie, że słup WZ jest zasypany ziemią tak, że ponad poziom ziemi wystaje tylko wierzchołek WO . Jest rzeczą zrozumiałą, że w tych warunkach w punkcie O można byłoby przyłożyć (bez obawy niebezpiecznego zgięcia) siłę F_{dzw} o wartości nadzwyczaj wielkiej.

Zacniemy teraz słup stopniowo odkopywać. Dozwolona siła F_{dzw} będzie coraz to mniejsza. Gdy odkopimy do poziomu X a więc gdy nadziemna część słupa WX będzie miała wysokość x , dozwolona siła pozioma w punkcie O będzie miała wartość F_{dzw}^x . Wartość tę znajdziemy, dzieląc dopuszczalny moment zginania M_{dzw}^x przez ramię siły $x - x^0$

$$F_{dzw}^x = \frac{M_{dzw}^x}{x - x^0} = \frac{\pi}{32} \frac{(d^W + \Delta \cdot x)^3 \cdot k}{x - x^0} \quad (d)$$

Na rys. 16 linia mn_1z_1 (dwukreskowa, niżej przerywana) ilustruje powyższe równanie względem nakreślonych spólrzędnych: F , x . Jest to kresa największej dopuszczalnej siły poziomej. Gdy $x = x^0$, to $F_{dzw}^0 = \infty$. W miarę zwiększania x (t. j. w miarę odkopywania słupa), na wartość siły F_{dzw} wpływają dwa czynniki:

1. wzrost ramienia $x - x^0$,
2. wzrost średnicy słupa o wartość $\Delta \cdot x$.

Jak widać z równania (d), pierwszy czynnik zmniejsza

wartość siły, drugi — z większą. Oba czynniki zmagają się ze sobą. Początkowo przeważa wpływ czynnika pierwszego, a siła F_{dzw} zmniejsza się (na wykresie — linja pełna mn_1), początnąc zaś od poziomu N przeważa czynnik drugi, a siła F_{dzw} zwiększa się stopniowo (na wykresie — linja przerywana n_1z_1).

Zwiększanie się dopuszczalnej siły F_{dzw} w odcinku przyziemnym nie ma znaczenia realnego. Zwiększanie się to dowodzi, że na poziomie N jest przekrój niebezpieczny. Cóż z tego, że przekroje niżej położone mogłyby wytrzymać większą siłę, skoro przekrój N większej siły jużby nie wytrzymał? Tak więc największa siła dopuszczalna F_{dzw} jest w zgodzie z równaniem (d) tylko dla poziomów powyżej przekroju niebezpiecznego. Dla odcinka zaś poniżej tego przekroju siła F_{dzw} ma wartość stałą, równą wartości F , dopuszczalnej dla przekroju niebezpiecznego. A zatem realny przebieg wykresu $F_{dzw} = f(x)$ da nam linja, złożona z krzywej mn_1 i prostej n_1z_3 , równoległej do osi x .

Długość odcinka słupa od wierzchołka W do przekroju niebezpiecznego N nazywamy krytyczną wysokością słupa x_{kr} .

Krytyczną wysokość słupa x_{kr} można obliczyć drogą rachunkową. Wróćmy do równania (d)

$$F_{dzw}^x = \frac{\pi}{32} \frac{(d^W + \Delta \cdot x)^3 \cdot k}{x - x^0} = f(x).$$

Siła F_{dzw}^x osiągnie minimum, gdy

$$\frac{dF_{dzw}^x}{dx} = 0$$

$$\frac{dF_{dzw}^x}{dx} = \frac{\pi}{32} k \frac{(d^W + \Delta \cdot x)^2}{(x - x^0)^2} \{(x - x^0) \cdot 3 \cdot \Delta - (d^W + \Delta \cdot x)\} = 0,$$

wówczas rzędna x będzie się równała wysokości krytycznej x_{kr}

$$(x_{kr} - x^0) \cdot 3 \cdot \Delta - (d^W + \Delta \cdot x_{kr}) = 0;$$

stąd znajdujemy wartość wysokości krytycznej

$$\boxed{x_{kr} = \frac{d^W}{2 \cdot \Delta} + 1,5x^0}. \quad (19)$$

Wysokość krytyczna jest tem większa, im słup jest grubszy (d^W), im większy jest odstęp (x^0) od wierzchołka do punktu przy-

łożenia siły i im mniejszy jest przyrost (Δ) średnicy na jednostkę długości. Natomiast zupełnie nie zależy od wartości siły przyłożonej (F).

Przykład 5. Słup z drzewa, nasyconego krezonaftą, o wysokości 1350 cm i średnicy u wierzchołka 12 cm, ma być obciążony siłą poziomą F w odstępnie od wierzchołka 95 cm. Obliczyć największą dopuszczalną wartość siły F .

Obliczamy długość krytyczną dla $d^W = 12$ cm, $\Delta = 0,007$ cm/cm, $x^0 = 95$ cm

$$x_{kr} = \frac{12}{2 \cdot 0,007} + 1,5 \cdot 95 = 1000 \text{ cm.}$$

Średnica w przekroju niebezpiecznym (N) wyniesie

$$d^N = 12 + 0,007 \cdot 1000 = 19 \text{ cm,}$$

największy dopuszczalny moment zginania w przekroju niebezpiecznym

$$M_{dzw}^N = \left(\frac{\pi}{32} 19^3 \right) \cdot 145 = 97\,300 \text{ kgcm,}$$

a największa dopuszczalna siła pozioma F

$$F = F_{dzw}^N = \frac{97\,300}{1\,000 - 95} = 107,5 \text{ kg.}$$

Zadanie jest już rozwiązane, ale dla wyjaśnienia sprawy obliczymy jeszcze dla innych przekrojów dopuszczalne momenty i siły.

Odstęp od wierzchołka	Średnica	Moment dopuszcz.	Siła dopuszcz.	Moment rzeczyw.
$x = 0$ cm (punkt W)	$d^X = 12,0$ cm	$M_{dzw}^X = 24\,500$ kgcm		
95 „ („ O)	12,7 „	29 100 „	$F_{dzw}^X = \infty$	$M^X = 0$ kgcm
340 „	14,4 „	42 300 „	173 kg	26 300 „
750 „	17,3 „	74 000 „	113 „	70 400 „
1 000 „ („ N)	19,0 „	97 300 „	107,5 „	97 300 „
1 350 „ („ Z)	21,5 „	(141 500 „)	(113 „)	134 900 „

W przykładzie powyższym otrzymaliśmy wysokość krytyczną mniejszą od całej wysokości słupa, a więc przekrój niebezpieczny wypadł powyżej poziomu ziemi. Gdyby wysokość krytyczna była większa od wysokości słupa, to przekrój niebezpieczny wypadłby poniżej powierzchni ziemi. Lecz wzór (19) tyczy się tylko nadzie mniej części słupa i nie można go stosować do części słupa, zakopanej w ziemi. To też zgodnie z zasadą, podaną w § 3, że przekrój niebezpieczny nie może leżeć w ziemi, będziemy uważali, że w tym przypadku wypadłby u powierzchni ziemi (Z).

Przypuśćmy teraz, że punkt przyłożenia siły (O) leży aku-

rat na połowie wysokości słupa ($x^0 = 0,5 \cdot h^W$). Zgodnie z równaniem (19)

$$x_{kr} = \frac{d^W}{2 \cdot \Delta} + 0,75 h^W.$$

Wysokość krytyczna będzie najmniejsza, gdy średnica d^W będzie najmniejsza. Najmniejsza dopuszczalna średnica słupa drewnianego wynosi 12 cm, a więc najmniejsza wysokość krytyczna

$$x_{kr} = \frac{12}{2 \cdot 0,007} + 0,75 h^W = 857 + 0,75 h^W.$$

Z równania tego wynika, że wysokość krytyczna mogłaby być mniejsza od całkowitej wysokości słupa, gdyby wysokość całkowita przekraczała

$$4 \cdot 857 = 3428 \text{ cm.}$$

Ponieważ w przyrodzie nie ma tak wysokich słupów, przeto możemy powiedzieć ogólnie, że przekrój niebezpieczny w słupach drewnianych, obciążonych na połowie wysokości, wypada zawsze w przekroju przyziemnym.

Przy obliczaniu słupów mamy zwykle do czynienia z dwiema siłami: jedną—na średniej wysokości zawieszenia przewodów i drugą (parcie wiatru na słup) — na środku wysokości słupa.

Dla zorientowania się, gdzie leży przekrój niebezpieczny, obliczamy wysokość krytyczną, przypuszczając, że działa tylko siła pierwsza. Wysokość krytyczna przy działaniu obu sił zawsze będzie większa od znalezionej wartości.

Przykład 6. Obliczyć słup drewniany, nasycony chlorkiem cynku, przelotowy, dla linii, opisanej w przykładzie 1-ym (rys. 4).

W przykładzie 2-im (a także w przykł. 4-ym) obliczono słup zgruba i wyznaczono wymiary. Na podstawie tych wymiarów w przykładzie 1-ym obliczono wartości sił.

Z trzech przypadków obciążenia będzie najniekorzystniejszy (jak w przykładzie 3-im) przypadek a).

Przypadek a). Wiatr prostopadły do linii (rys. 6 — a).

$$P = 173 \text{ kg; } S = 93,5 \text{ kg; } Q = 143 + 50 + 386 = 579 \text{ kg;}$$

$$h^W = 775 \text{ cm; } h^0 = 693 \text{ cm; } d^W = 17 \text{ cm; } \Delta = 0,007 \text{ cm/cm; } d^Z = 22,4 \text{ cm}$$

Obliczamy wysokość krytyczną wg wzoru (19), przypuszczając, że działa samo tylko parcie wiatru na przewody:

$$x^0 = 775 - 683 = 92 \text{ cm}$$

$$x_{kr} = \frac{17}{2 \cdot 0,007} + 1,5 \cdot 92 = 1357 \text{ cm. } > 775 \text{ cm.}$$

Przekrój niebezpieczny wypada w poziomie przyziemnym.

Przy uwzględnieniu parcia wiatru na słup wysokość krytyczna powiększy się, jednak nie będzie to miało znaczenia praktycznego, a przekrój niebezpieczny pozostanie w poziomie przyziemnym. Dla przekroju Z

$$MZ = 173 \cdot 683 + 93,5 \cdot \frac{775}{2} = 154\,390 \text{ kgcm};$$

$$WZ = \frac{\pi}{32} \cdot 22,4^3 = 1103 \text{ cm}^3; \quad sZ = \frac{\pi}{4} \cdot 22,4^2 = 394 \text{ cm}^2;$$

$$pZ = \frac{154\,390}{1103} + \frac{579}{394} = 140 + 1,5 = 141,5 \text{ kg/cm}^2 < 145 \text{ kg/cm}^2.$$

Naprężenie nie przekracza granicy dopuszczalnej.

Wróćmy do wzoru (19). Przy pewnej stałej średnicy słupa d^W wysokość krytyczna x_{kr} jest funkcją odległości x^0 . Gdy

$$x^0 = 0,$$

x_{kr} osiąga minimum. A zatem najmniejsza wysokość krytyczna wypada wówczas, gdy całe obciążenie jest skupione u wierzchołka

$$(x_{kr})_{min} = \frac{d^W}{2\Delta}. \quad (e)$$

Najmniejsza wysokość krytyczna jest wprost proporcjonalna do grubości słupa i przy $\Delta = 0,007$ wynosi

$d^W = 12 \text{ cm}$	$(x_{kr})_{min} = 857 \text{ cm}$	$d^W = 19 \text{ cm}$	$(x_{kr})_{min} = 1357 \text{ cm}$
13 "	928 "	20 "	1428 "
14 "	1000 "	21 "	1500 "
15 "	1071 "	22 "	1570 "
16 "	1142 "	23 "	1641 "
17 "	1213 "	24 "	1713 "
18 "	1285 "		

Wysokość krytyczna dla obciążenia, skupionego poniżej wierzchołka, będzie zawsze większa.

Z tabeli powyższej możemy korzystać przy rozwiązywaniu zadań w rodzaju przykładu 6-go. W przykładzie tym mieliśmy słup o średnicy u wierzchołka $d^W = 17$ cm i o wysokości $h^W = 775$ cm. Najmniejsza wysokość krytyczna dla grubości 17 cm wynosi wg tabeli 1213 cm;

$$775 < 1213,$$

a więc przekrój niebezpieczny wypada w przekroju przyziemnym.

